

MATERIALI INTELLIGENTI PER EDIFICI NZEB

Opzioni tecnologiche adattive
per il progetto sostenibile

SMART MATERIALS FOR NZEB BUILDINGS

Adaptive technological solutions
for sustainable projects

Rosa Romano

ABSTRACT

L'articolo presenta alcuni dei risultati della ricerca europea COST Action TU 1403 Adaptive Envelope, finalizzata a mappare a livello internazionale l'innovazione tecnologica legata alla progettazione e realizzazione di sistemi di facciata adattivi, analizzando i subsistemi che dalla micro alla macro-scala permettono di raggiungere e superare i target energetico-ambientali previsti dalle normative nazionali e internazionali vigenti. Partendo dall'analisi dello stato dell'arte, la trattazione si focalizzerà in particolare sul tema dei materiali intelligenti utilizzabili per la realizzazione di sistemi di chiusura verticale a schermo avanzato, capaci di migliorare il comfort indoor e l'efficienza energetica di edifici nuovi ed esistenti. Attraverso l'analisi delle caratteristiche materiche, tecnologiche e funzionali, saranno definiti i parametri qualitativi e prestazionali che ne caratterizzano l'utilizzo e il funzionamento a scala reale.

The paper shows some of the results of the European research COST Action TU 1403 Adaptive Envelope, whose aim is to map technological innovation at an international level, linked to design and creation of adaptive façades systems, by analysing the sub-systems that from the micro to the macro scale allow to reach and exceed the energy-environmental targets foreseen by the current national and international regulations. Starting by analysing the state of the art, the paper will focus in particular on the subject of smart materials that can be used to create vertical closure systems with advanced screens, capable of improving indoor comfort and energy efficiency of new and existing buildings. Through the analysis of their material, technological and functional characteristics, will be defined the qualitative and performance parameters that influence their use and function on a full-scale.

KEYWORDS

materiali nano-strutturati, comfort indoor, involucro adattivo, nZEB, efficienza energetica

nanostructured materials, indoor comfort, adaptive envelope, nZEB, energy efficiency

Rosa Romano, Architect and PhD, is a Researcher at the Department of Architecture in Florence (Italy). She carries out research mainly on the subjects of Environmental Sustainability and Energy Efficiency in Building, focusing in particular on the topic of design and energy evaluation of innovative façade components for the Mediterranean climate. Mob. +39 338/866.84.38 | E-mail: rosa.romano@unifi.it

L'aumento del consumo di energia, la riduzione delle risorse e l'incremento dei costi energetici per la climatizzazione degli edifici hanno contribuito negativamente sulla nostra qualità della vita e rischiano di compromettere in modo irreversibile quella delle generazioni future. In questa situazione, la progettazione e lo sviluppo di soluzioni di involucro integrate, energeticamente efficienti e capaci di garantire buone prestazioni termiche durante tutto l'arco dell'anno, diventano una priorità a livello internazionale. Da queste premesse nasce la necessità di progettare soluzioni tecnologiche innovative in grado di garantire comportamenti adattivi (alla macro, micro e nano scala), integrando nel manufatto architettonico materiali e sistemi di automazione e controllo capaci di renderlo mutevole nel tempo in risposta alle sollecitazioni climatiche e alle esigenze di comfort indoor degli utenti.

Negli ultimi decenni, l'edificio contemporaneo si è trasformato da elemento statico a elemento dinamico caratterizzato dalla presenza di materiali nano-strutturati e intelligenti, sviluppati come sistemi organici o sintetici che possiedono funzioni tecnologiche incorporate e che operano attraverso cambiamenti di proprietà o attraverso la capacità di regolare i flussi energetici passanti (Addington and Schodek, 2005). Una delle caratteristiche maggiormente connotante dei materiali intelligenti è quella di essere in grado di trasformare le loro proprietà fisiche e/o la loro forma, o di scambiare energia in modo autonomo (Reichert, Menges and Correa, 2014). Si tratta, infatti, di nuovi materiali sviluppati manipolando la materia alla scala nanometrica, oggetto di studio e trasferimento tecnologico tra settori scientifici disciplinari assai diversi, in relazione alla possibilità d'incrementare le loro prestazioni secondo standard termofisici e meccanici sempre più performanti (Del Grosso and Basso, 2010). Attraverso la possibilità d'integrare questi nuovi materiali in sistemi di involucro complessi è possibile incrementare la capacità adattiva dell'intero edificio, migliorando le condizioni di comfort indoor e outdoor. In altre parole, l'intelligenza del materiale si trasferisce dal sistema tecnologico, al corpo di fabbrica e di conseguenza all'intera città, contribuendo a definire nuovi scenari urbani.

Partendo da queste premesse, l'articolo presenta alcuni dei risultati della ricerca europea COST Action TU 1403 (Aelenei et alii, 2018), finalizzata a mappare a livello internazionale l'innovazione tecnologica legata alla progettazione e realizzazione di sistemi di facciata adattivi, attraverso la catalogazione di materiali, componenti e sistemi sviluppati negli ultimi decenni a scala globale. L'obiettivo è di definire sinteticamente lo stato dell'arte, tracciando i processi d'innovazione che hanno reso i materiali nanostrutturati fondamentali per la progettazione e realizzazione di sistemi d'involucro responsivi e a basso impatto ambientale, capaci di mutare le proprie prestazioni e configurazioni se stimolati dall'ambiente e dagli utenti. Infine, attraverso l'analisi di alcuni casi studio, saranno definite le tendenze future legate alla loro integrazione architettonica alle varie scale dell'ambiente costruito.

La ricerca COST Action Adaptive Envelope

Uno dei principali obiettivi della ricerca europea COST Action TU 1403 Adaptive Envelope (Aelenei et alii, 2018), iniziata nel 2015 e proseguita fino al 2019, è stato quello di definire l'innovazione sul tema dell'involucro adattivo, realizzando un database organizzato in tre macro capitoli dedicati a materiali, componenti e sistemi di facciata, nel quale sono stati catalogati 156 casi studio tra sperimentazioni, prototipi e realizzazioni. La ricerca ha evidenziato come il concetto di responsività sia strettamente connesso alla presenza alla micro-scala di materiali 'intelligenti' e dispositivi di automazione che definiscono l'adattività dei sistemi di facciata e dell'intero edificio rispetto a una dinamicità intrinseca o estrinseca, capace di influenzare il progetto architettonico e di incidere sulle prestazioni energetiche dell'intero edificio, e talora anche del contesto urbano nel quale esso è inserito.

In altre parole, un sistema adattivo deve essere in grado d'interagire con l'ambiente circostante (interno o esterno), elaborando in modo autonomo le informazioni acquisite per trasformarle in una reazione (movimento, deformazione o cambiamento delle proprietà materiali) che si manifesta per un periodo di tempo determinato. Il grado di adattabilità (graduale o immediato) può essere quindi relazionato in modo univoco al tempo di reazione (secondi, minuti, ore, ciclo giorno-notte, stagionale, annuale, decennale) e alla scala spaziale (nano, micro e macro scala) rispetto alla quale si verifica il cambiamento (Aelenei et alii, 2019). Di conseguenza gli involucri dinamici possono essere definiti come soluzioni tecnologiche innovative, costituite da sistemi integrati (materiali e componenti) che sono in grado di modificare le loro funzioni, estetiche o comportamentali, in risposta alla necessità di garantire prestazioni energetiche transitorie rispetto a condizioni al contorno variabili (Luiblé and Overend, 2018). È evidente come il concetto di involucro adattivo risulti fortemente connesso a quello di materiale innovativo.

Velikov e Thün (2013) definiscono i materiali intelligenti come sistemi abili a interagire con le condizioni ambientali esterne attraverso cambiamenti interni di proprietà fisiche o attraverso scambi di energia. L'intelligenza del materiale è determinata dalla presenza di una o più delle seguenti caratteristiche: 1) Immediatezza – capacità di risposta in tempo reale a una sollecitazione proveniente dall'ambiente esterno; 2) Transitorietà – possibilità di assumere più stati fisici (solido, liquido, aeriforme) in risposta a stimoli ambientali definiti; 3) Auto-attuazione – possibilità d'interazione autonoma con condizioni a contorno determinate e in assenza di stimoli meccanici esterni; 4) Selettività – capacità di scegliere una risposta determinata rispetto a input esterni definiti; 5) Istantaneità – possibilità di cambiare forma e dimensione rispetto a una configurazione geometrica determinata in corrispondenza dell'evento di 'attivazione'.

L'analisi dei casi studio raccolti nel database evidenzia come la necessità di migliorare le prestazioni energetiche globali dell'edificio, legata all'esigenza di produrre energia rinnovabile (termica o fotovoltaica) a scala locale, abbia deter-

minato la sperimentazione e la conseguente produzione di materiali capaci d'interagire in modo dinamico con la radiazione solare incidente, variando in modo naturale o artificiale la loro massa superficiale (passando dallo stato liquido a quello solido), la loro forma (allungandosi, contraendosi, curvandosi) o la loro trasparenza (passando allo stato traslucido o riflettente).

La ricerca COST ha messo in evidenza, infine, come la diffusione nel mondo delle costruzioni di sistemi di facciata adattivi sia fortemente influenzata dalla possibilità di utilizzare già nella fase progettuale nuovi strumenti di modellazione e verifica – BIM e BEM – capaci d'interagire con i sistemi di produzione digitale (stampanti 3D), con l'obiettivo di controllare non solo le caratteristiche dimensionali e prestazionali del manufatto edilizio ma anche e soprattutto il suo impatto ambientale in termini LCA e LCC. Lo scopo è quello di massimizzare la customizzazione del prodotto partendo dalla definizione delle caratteristiche del materiale, riciclato o riciclabile, e garantendo la totale reversibilità del manufatto (Correa and Menges, 2017). La possibilità di utilizzare materiali nanostrutturati permette, infatti, d'incrementare le prestazioni energetiche e ambientali di sistemi di facciata assemblati a secco, senza incidere sul loro peso o il loro spessore, così da favorirne l'utilizzo non solo per la realizzazione di nuovi edifici nZEB ma anche negli interventi di ristrutturazione energetica profonda, finalizzati a ridurre drasticamente i consumi termici degli edifici esistenti senza comprometterne le caratteristiche strutturali.

Di seguito saranno definiti i materiali catalogati nell'ambito della ricerca, divisi in relazione al loro comportamento adattivo in due macrogruppi: cinetici e termici. In entrambi i casi si tratta di materiali in grado di contribuire in modo dinamico al bilancio energetico dell'edificio, regolando uno o più dei seguenti fattori: 1) guadagni solari passivi, 2) direzione e intensità del flusso termico passante; 3) direzione e intensità del flusso luminoso passante; 4) prestazioni di accumulo termico; 5) capacità di produrre energia rinnovabile.

Materiali a comportamento cinetico | A questa categoria afferiscono sia alcune tipologie di metallo (termo-bimetalli e leghe a memoria di forma) e di materiali plastici (polimeri composti), reattivi a sollecitazione termica indotta o provocata dalla radiazione solare incidente, sia alcune varietà di fibre di legno capaci di deformarsi in corrispondenza della variazione igroscopica della loro struttura cellulare. I termo-bimetalli trovano applicazione, in particolare, in sistemi di schermatura cinetici costituiti da supporti metallici reticolari, come quelli realizzati dall'americana D. Sung (Hawkes et alii, 2010). Si tratta di elementi modulari di piccole dimensioni costituiti da due fogli di alluminio che hanno l'abilità di piegarsi in pochi secondi, in modo autonomo e senza la presenza di attuatori. Questo comportamento è possibile perché i due strati metallici, pur essendo laminati insieme, se sottoposti a sollecitazione termica hanno la capacità di espandersi con velocità diverse, tornando nella loro posizione iniziale quando questa sollecitazione viene a mancare (Figg. 1, 2).



Figg. 1, 2 | D. K. Sung, Thermal Bimetal 'Bloom', Los Angeles, and the adaptive behaviour analysis (credits: M. Locke; D. K. Sung).

Le leghe a memoria di forma, che possono essere utilizzate come attuatori a basso contenuto tecnologico in sistemi di facciata complessi, presentano un'elasticità maggiore dei termo-bimetalli e, come suggerito dal loro stesso nome, sono capaci di mantenere memoria della forma iniziale che riacquistano dopo una deformazione indotta da fenomeni di surriscaldamento. In questo caso, la capacità dinamica è data dalla composizione chimica dei metalli utilizzati e talora può essere indotta da sollecitazioni elettriche esterne (Juaristi, Gómez-Acebo and Monge-Barrio, 2018).

Analogamente ai termo-bimetalli e alle leghe a memoria di forma, anche alcune categorie di polimeri possono presentare capacità adattiva più o meno accentuata, grazie alla presenza nella loro struttura molecolare di almeno due strati di materiale plastico caratterizzati da diversi coefficienti di dilatazione termica. L'anisotropia del materiale può essere determinata nella fase di produzione, caratterizzando il comportamento cinetico dei vari strati attraverso l'utilizzo di stampanti 3D. Tra gli esempi più inte-

ressanti dell'applicazione dei polimeri compositi alla scala architettonica ricordiamo: il prototipo KUMORigami, realizzato assemblando su un supporto metallico un sistema di elementi plastici esagonali capaci di deformarsi se sottoposti a sollecitazione elettrica, favorendo il passaggio di luce e aria dall'esterno all'interno di uno spazio confinato (Pesenti, Masera and Fiorito, 2018); l'originale sistema di schermatura solare ShapeShift (Figg. 3, 4), realizzato con elementi quadrangolari di materiale acrilico capaci di cambiare forma, aprendosi e chiudendosi, se sottoposti a sollecitazione termica (Kretzer and Rossi, 2012); il prototipo di chiusura trasparente Living's Kinetic Glass, caratterizzato dalla presenza di elementi modulari di gomma trattata con uretano e integrata con lega a memoria di forma, sensibili alla presenza di CO₂ nell'ambiente (Yoneda, 2007).

Tra i materiali cinetici a basso impatto ambientale non possiamo infine dimenticare il legno che, grazie alla sua natura anisotropica, può deformarsi, curvandosi in modo naturale se sottoposto a sollecitazione igroscopica. Ele-

menti di varie forme e dimensioni, ma caratterizzati da spessori contenuti, possono così essere integrati in sistemi di chiusura verticale e orizzontale per controllare, in modo autonomo o attraverso dispositivi di attuazione, la ventilazione naturale, la trasmissione del calore o il passaggio della radiazione solare incidente (Fig. 5). In anni recenti, la possibilità di manipolare il legno dal punto di vista cellulare ha permesso di realizzare in laboratorio particolari sistemi compositi, nei quali strati di materiale legnoso sensibile all'umidità sono alternati a fibre sintetiche, come ad esempio il PTFE, con l'obiettivo di limitare la laminazione del materiale nel tempo e il suo conseguente degrado estetico e meccanico (Wood et alii, 2016). La possibilità di utilizzare sistemi di modellazione tridimensionale e di stampa 3D ha permesso, infine, d'integrare celle fotovoltaiche BIPV (Fig. 6) con micro-lamelle di legno, capaci d'interagire con l'ambiente esterno non solo per schermare eventuali superfici trasparenti, ma anche e soprattutto per produrre energia (Mazzucchelli et alii, 2018).

Materiali a comportamento termico | Si tratta in prevalenza di materiali trasparenti o traslucidi, che per le loro caratteristiche intrinseche sono in grado di modulare i flussi termici passanti, ottimizzando le prestazioni termoigrometriche dell'involucro architettonico opaco e trasparente, in termini di isolamento termico, durante tutto l'arco dell'anno. A questo gruppo di materiali intelligenti appartengono i vetri elettrocromici, termocromici e fotocromici, capaci di cambiare colore e grado di trasparenza e riflettanza se sottoposti a sollecitazione termica naturale o indotta da stimoli elettrici, limitando di conseguenza i fenomeni di abbagliamento e surriscaldamento all'interno dell'edificio. Si tratta di materiali nati per il settore automobilistico, che stanno trovando una discreta applicazione anche in quello edilizio (Romano, 2010).

Negli ultimi anni, sono state avviate sperimentazioni sulla possibilità di creare in laboratorio stratigrafie trasparenti nano-strutturate all'interno delle quali poter far circolare del fluido termovettore utilizzabile per riscaldare o raffreddare lo spazio confinato. È questo il caso del progetto Microfluidic Glass (Fig. 7) sviluppato dall'inglese Alston che, grazie alla presenza di un reticolo di micro-connettori e terminazioni tubolari, si comporta come un sistema radiante a parete alimentato dalla radiazione solare incidente (Alston, 2015).

Alla categoria dei materiali a comportamento termico appartengono i materiali isolanti trasparenti (TIM), gli aereogel e i materiali a cambiamento di fase (PCM). I TIM, brevettati per la prima volta in Germania negli anni Ottanta con la sigla TWD, sono costituiti da elementi plastici o vetrosi, trasparenti nel visibile e nel vicino infrarosso. Si tratta di materiali caratterizzati da una struttura capillare a nido d'ape, ispirata alla struttura biologica della pelliccia dell'orso polare, che consentono, grazie alla particolare composizione materica e geometrica, di ridurre gli scambi radiativi e bloccare i moti convettivi dell'aria al loro interno, trasformandoli in calore. I TIM possono essere classificati in relazione alla struttura geometrica del materiale che li costituisce – parallela o perpendicolare alla superficie vetrata – e alla loro capacità di garantire la trasmissione solare. I pannelli a guadagno diretto, realizzati con fibre parallele dello spessore tra uno e due millimetri, presentano un'ottima capacità isolante e sono stati oggetto di interessanti sperimenta-

zioni da parte dell'architetto T. Herzog che li ha ampiamente utilizzati in molti dei suoi progetti (Herzog, Krippner and Lang, 2017).

Gli aereogel sono materiali costituiti da particelle di silice, la cui disposizione spaziale è ottenuta attraverso particolari processi produttivi. Una delle caratteristiche fisiche più importanti di questi materiali è la modesta densità apparente, in quanto circa il 96% del materiale è caratterizzato da aria mentre solo il 4% è realizzato con una matrice di diossido di silicio. Grazie al ridotto peso specifico (pari ad appena 3 kg/m³) e alla bassa conduttività termica (spesso inferiore a 0,2 W/mK), gli aereogel si prestano a svariate applicazioni nel settore dell'architettura, contribuendo a migliorare le prestazioni di isolamento termico dei sistemi di facciata continua multistrato. La realizzazione dei primi prototipi di questo materiale avvenne a partire dagli anni Trenta, quando S. Kistler pensò di sottrarre a un blocco di gel la parte liquida lasciando invece integra la parte solida.

Con ulteriori sperimentazioni, si arrivò a sostituire la componente liquida con l'aria, realizzando un materiale dalle ottime qualità e dal peso specifico ridotto. Grazie a questi accorgimenti il processo di produzione degli aereogel è diventato più economico e sicuro, oltre che a minor impatto ambientale. Attualmente l'aereogel si trova in commercio nei formati granulare e monolitico, ed è utilizzato per realizzare componenti di facciata trasparente nei quali il materiale viene incapsulato tra due superfici vetrate sigillate con un telaio metallico a taglio termico, garantendo buone prestazioni in termini di trasmittanza termica e trasmissione solare (Romano, 2010).

Infine, tra i materiali intelligenti a comportamento termico che hanno trovato maggiore diffusione nel settore delle costruzioni nelle ultime decadi, non possiamo dimenticare i PCM, brevettati negli anni Ottanta dalla NASA e utilizzati come materiali coibenti in grado di garantire buone prestazioni d'isolamento e inerzia termica, grazie alla capacità d'immagazzinare e rilasciare calore nella fase di transizione solido-liquida (Memon, 2014). Si tratta di materiali versatili che si prestano a molteplici applicazioni a scala edilizia. Grazie alla capacità di cambiare struttura molecolare in relazione alle sollecitazioni termiche esterne, i PCM sono particolarmente adatti a essere applicati anche in climi temperati come quelli del sud Europa dove ga-

rantiscono un buon comportamento in termini d'inerzia termica anche nei mesi estivi. Tra le soluzioni tecnologiche di chiusura verticale opaca analizzate nell'ambito della ricerca COST emerge che i PCM sono spesso utilizzati come sistemi di accumulo passivo di energia termica e sono prevalentemente impiegati nella realizzazione di soluzioni tecnologiche di chiusure verticali opache, progettate come 'muri solari'.

È questo il caso del sistema di facciata Solar XXI (Fig. 8), brevettato dal Centro di Ricerca portoghese Lneg (Aelenei et alii, 2014), e del prototipo SELFIE, sviluppato nell'ambito dell'omonima ricerca nazionale dal Centro Interuniversitario ABITA di Firenze (Gallo and Romano, 2018). In entrambi gli esempi la stratigrafia è caratterizzata dalla presenza di un'intercapedine d'aria tra il rivestimento esterno (realizzato con un pannello fotovoltaico) e lo strato nel quale è integrato il PCM. Delle bocchette posizionate in corrispondenza della superficie esterna del sistema di facciata permettono di controllare la velocità e la temperatura interna dello strato d'aria presente nell'intercapedine, contribuendo a migliorare le prestazioni del pannello fotovoltaico nei mesi estivi e il comportamento dinamico del PCM che è in grado di accumulare calore durante il giorno rilasciandolo, in parte per irraggiamento e in parte per convezione, verso l'ambiente a temperatura più bassa nelle ore notturne.

Nelle applicazioni a pavimento o nei sistemi di riscaldamento e raffreddamento radiante, l'uso dei PCM può ridurre il surriscaldamento delle superfici orizzontali direttamente esposte alla radiazione solare, stabilizzando la temperatura del materiale entro un intervallo vicino alla temperatura di fusione. In queste applicazioni, il PCM è in grado di assorbire e immagazzinare l'energia in eccesso (dovuta alla radiazione solare incidente o ai carichi termici interni) che altrimenti causerebbe il surriscaldamento dello spazio confinato. L'energia accumulata dal materiale può essere riutilizzata successivamente per riscaldare l'edificio o, in alternativa, può essere facilmente rimossa con un sistema idronico.

La versatilità del materiale permette di utilizzarlo per realizzare anche componenti di chiusura trasparente: è questo il caso dei sistemi di facciata brevettati dall'azienda tedesca Glassx (Fig. 9). Si tratta di pannelli dotati di porzioni multicamera trasparenti e traslucide, caratterizzate dalla presenza di PCM nella camera più interna

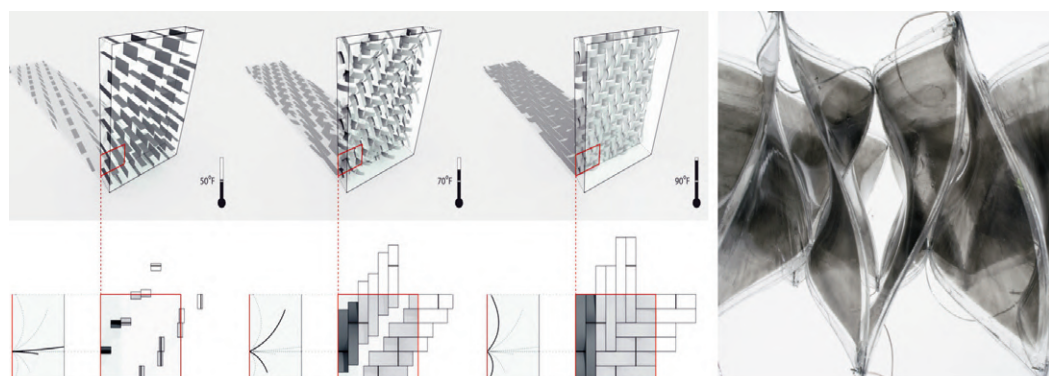
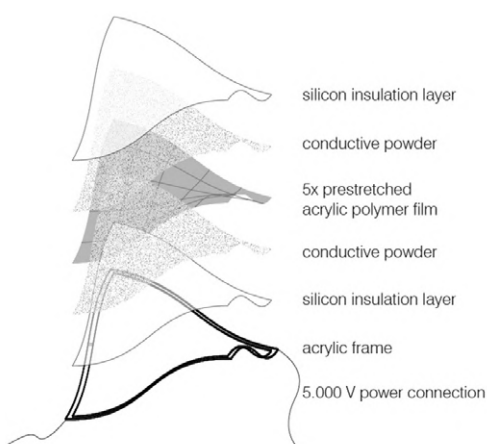


Fig. 3, 4 | M. Kretzer, D. Rossi, E. Augustynowicz, S. Georgakopoulou and S. Sixt, 'ShapeShift', Zürich, 2010 (credit: M. Kretzer).

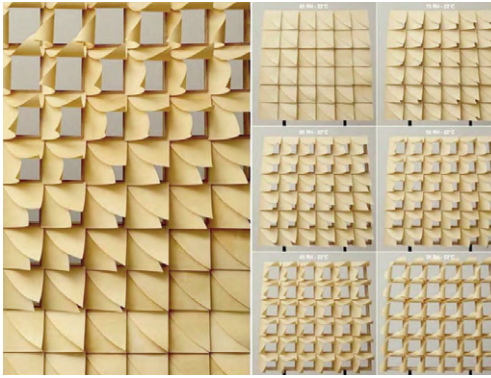


Fig. 5 | AchimMenges Architect, 'Hygriscope', Centre Pompidou, Paris, 2012 (source: www.achimmenges.net).

Fig. 6 | E. S. Mazzucchelli and L. Doniacovo, 'BIPV Adaptive Flakes', Milan, 2016 (credit: E. S. Mazzucchelli, 2016).



della vetrata. I moduli sono sviluppati come una chiusura trasparente dotata di quattro pannelli vetrati e tre camere: la prima elio-selettiva, la seconda isolante e la terza saturata con il materiale a cambiamento di fase. Questo innovativo sistema di facciata, che si basa su una semplice stratigrafia, riesce a conferire un'immagine mutevole e dinamica all'edificio, grazie alla diversa colorazione assunta dai sali idrati durante il cambiamento di fase.

Conclusioni | Dall'analisi condotta emerge come i materiali intelligenti e le facciate adattive siano stati oggetto di un processo d'innovazione tecnologica che ha permesso d'introdurre e sperimentare nuovi prodotti, schermanti e isolanti, con prestazioni termoigrometriche e igroscopiche assimilabili a quelle di organismi viventi, capaci di adattarsi durante tutto l'arco dell'anno a condizioni al contorno variabili per garantire in tempo reale il comfort indoor all'interno dello spazio confinato. È altresì evidente come le esperienze in atto siano orientate a introdurre nel mondo delle costruzioni soluzioni preassemblate a secco, leggere e resistenti, che attraverso processi di progettazione parametrica e di manifattura digitale, possano essere customizzate velocemente, garantendo ottime prestazioni energetiche e ambientali, anche e soprattutto nelle zone a clima temperato e caldo. Molti dei materiali presentati sono stati pensati, infatti, per schermare esternamente o internamente le superfici vetrate o per incrementare l'inerzia termica di componenti opachi e trasparenti, limitando i fenomeni di surriscaldamento interno estivo.

Tuttavia, se i PCM, i TIM ed alcune tipologie di vetri elettrocromici e selettivi hanno superato abbondantemente la fase di sperimentazione, altrettanto non può essere affermato per molti dei materiali cinetici o per gli aerogel, ancora oggetto di analisi alla fase prototipale. Nonostante ciò, l'accelerazione registrata negli ultimi anni in termini di trasferimento tecnologico da settori scientifici apparentemente lontani (quali ad esempio la fisica, l'ingegneria spaziale, la chimica, l'informatica, ecc.) verso il mondo dell'architettura, ci permetterà di colmare presto questo divario, favorendo addirittura la nascita di una nuova generazione di materiali dotati di intelligenza

intrinseca, capaci di evolversi, auto-pulirsi e auto-ripararsi, contribuendo alla creazione, a partire dalla micro scala, di architetture organiche e resilienti in armonia con l'uomo e la natura.

The increase of energy consumptions, the reduction of resources and the rise of energy costs for air conditioning of buildings have negatively contributed to our quality of life and risk to irreversibly compromising that of future generations. In this scenario, the design and development of integrated, energy-efficient envelopes, capable of guaranteeing good thermal performance throughout the year become an international priority. This situation generates the need to design adaptive technological solutions capable of ensuring adaptive behaviours (to macro, micro and nano scale), including materials and automation and control systems in the architectural artefact to make it change over time according to climatic conditions and users' requirements.

Over the last decades, buildings have become dynamic elements characterized by the presence of nano-structured and intelligent materials, developed as organic or synthetic systems, having built-in technological functions and operating through property transitions or the ability to regulate transferring flows of energy (Addington and Schodek, 2005). One of the main characteristics of smart materials is being capable of transforming their physical properties and/or their shape, or to autonomously exchange energy (Reichert, Menges and Correa, 2014). In fact, we are talking about new materials developed by manipulating the matter at the nano scale. They are objects of study and of technology transfer between different scientific sectors, in relation to the possibility of increasing their performance according to growingly efficient thermophysical and mechanical standards (Del Grosso and Basso, 2010). By including these new materials in complex envelope systems, it is possible to increase the adaptive ability of the building, improving indoor and outdoor comfort conditions. In other words, the intelligence of the material is transferred from the technological system to the building and consequently

to the whole city, helping to create new urban scenarios.

On this basis, the paper shows some of the results of the European research COST Action TU 1403 (Aelenei et alii, 2018), whose aim is to map at an international level technological innovation, linked to design and creation of adaptive façade systems, by listing materials, components and systems developed over the last decades on a global scale. The objective is to shortly present the state of the art, defining the innovation processes that have made nano-structured materials fundamental for the design and construction of responsive and low environmental impact envelope systems, capable of changing their performance and configurations if stimulated by the environment and users. Finally, through the analysis of some case studies, we will define the future trends linked to their architectonic integration at different scales of the built environment.

COST Action Adaptive Envelope Research |

One of the main objectives of the European research COST Action TU 1403 Adaptive Envelope (Aelenei et alii, 2018) – started in 2015 and ended in 2019 – was to define innovation on the subject of the adaptive envelope, creating a database organized in three macro chapters about materials, components and façade systems, in which 156 case studies about experiments, prototypes and realizations were listed. The research has highlighted the close link between responsiveness and the presence at the microscale of 'smart' materials and of automation devices that define the adaptiveness of façade systems and of the whole building with respect to an intrinsic or extrinsic dynamism, capable of influencing the architectural project and affecting the energy performance of the building, and sometimes, also of its urban context.

In other words, an adaptive system must be able to interact with the surrounding – indoor and outdoor – environment, autonomously processing the acquired information to transform it into a reaction (movement, deformation or material properties change) that occurs in a specific period of time. The level of adaptability (gradual or immediate) can, therefore, be uniquely linked to the reaction time (seconds, min-

utes, hours, day-night cycle, season, year, ten-year span) and the spatial scale (nano, micro and macro) according to when and where the change occurs (Aelenei et alii, 2019). As a consequence, the dynamic envelopes can be defined as innovative technological solutions, composed by integrated systems (materials and components) that can modify their aesthetic or behavioural functions, in response to the need to guarantee transient energy performances with respect to variable boundary conditions (Luible and Overend, 2018). The concept of an adaptive envelope is strongly linked to the idea of innovative material.

Velikov and Thün (2013) define smart materials as systems capable of interacting with external environmental conditions through internal changes of their physical properties or energy exchanges. The intelligence of the material is determined by the presence of one or more of the following characteristics: 1) Immediacy – ability to immediately respond to a solicitation from the external environment; 2) Transitoriness – possibility of changing more physical states (solid, liquid, gas) in response to specific environmental stimuli; 3) Self-implementation – possibility of autonomous interaction with specific boundary conditions and without external mechanical stimuli; 4) Selectivity – ability to choose a specific response with respect to specific external stimuli; 5) Immediacy – possibility to change shape and size with respect to a specific geometric configuration at ‘activation’.

The analysis of the case studies collected into the database shows how the need to improve the overall energy performance of the building – linked to the need to produce renewable energy (thermal or photovoltaic) on a local scale – has led to experimentation and the consequent production of materials capable of dynamically interact with incident solar radiation, changing in a natural or artificial way

their surface density (from liquid to solid-state), their shape (extending, contracting, curving) or their transparency (from opaque to translucent or reflective state).

Finally, the COST research has highlighted how the diffusion of adaptive façades in the building industry is strongly influenced by the possibility of using, even from the design stage, new modelling and verification tools – BIM and BEM – capable of interacting with digital manufacturing systems (3D printers), with the aim of controlling both the dimensional and thermo-hygrometric characteristics of the building and its environmental impact in terms of LCA and LCC. The aim is to maximize the customization of the product starting by outlining the characteristics of the recycled or recyclable material and by ensuring its reversibility (Correa and Menges, 2017). The possibility to use nano-structured materials allows to increase the energy and environmental performances of dry-assembled façade systems, without affecting their weight or their thickness, to promote their integration, not only in the construction of new nZEB buildings but also in the deep renovation actions drastically reducing the thermal consumption of existing buildings without compromising their structural characteristics.

Below will be presented the materials listed during the research, divided according to their adaptive behaviour in two macro groups: kinetic and thermal. In both cases, the material can dynamically contribute to the energy balance of the building, regulating one of more of the following aspects: 1) passive solar gains; 2) direction and intensity of the transferring heat flow; 3) direction and intensity of the transferring light flow; 4) thermal storage performance; 5) ability to produce renewable energy.

Kinetic Materials | This category includes some types of metals (thermal bimetal and shape memory alloys) and plastic materials (polymer

composites), reactive to thermal stress induced or caused by incident solar radiation, and some types of wood fibres capable of deforming at the hygroscopic variation of their cellular structure. The thermal bimetal can be used, particularly, in kinetic shade systems built with metal mesh supports as the ones built by the American D. Sung (Hawkes et alii, 2010). These are small modular elements made up of two aluminium sheets that can bend in seconds, autonomously and without any actuator. This is possible because if the two sheets – even though they are laminated – are subjected to thermal stress, they expand at different speeds, returning to their initial position when this stress ends (Fig. 1, 2).

Shape memory alloys, which can be used as low-technology actuators in complex façade systems, have a higher elasticity than thermal bimetal and, as suggested by their name, they are able to preserve the memory of its initial shape that they regain after a deformation caused by overheating phenomena. In this case, the dynamic capacity originates from the chemical composition of the metals used and sometimes it can be induced by external electrical stresses (Juaristi, Gómez-Acebo and Monge-Barrio, 2018).

As with thermal bimetal and shape memory alloys, some types of polymers can have a variable adaptive capacity, thanks to the presence in their molecular structure of at least two layers of plastic material characterized by varied coefficients of thermal expansion. The material’s anisotropy can be determined in the production stage, characterizing the kinetic behaviour of the various layers using 3D printers. Among the most interesting examples of polymer composites at an architectural scale there are: the KUMORigami Prototype, created by assembling a pattern of hexagonal plastic elements on a metal support capable of folding if subjected to electrical stress, allowing light

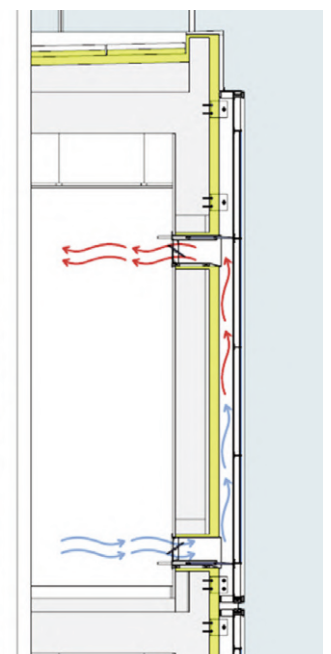
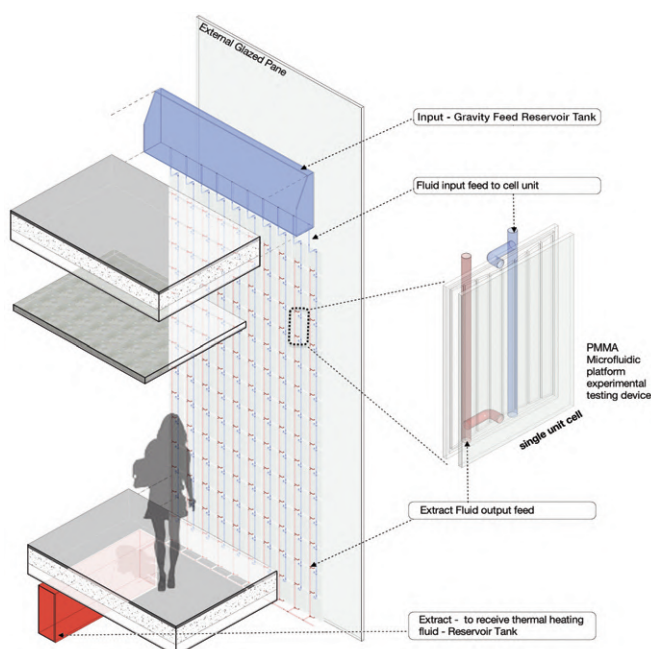


Fig. 7 | M. Alston, ‘Microfluidic Glass’, 2015 (credit: M. E. Alston, 2015).

Fig. 8 | P. Cabrita, I. Diniz and L. Aelenei, ‘Solar XXI – BIPV/T Systems’, Lisbon, 2006 (credit: L. Aelenei).



Fig. 9 | 'GlassX' architecture, Zürich, 2004 (source: www.glassx.ch/en/).

and air to pass from outside in a confined space (Pesenti, Masera and Fiorito, 2018); the ShapeShift solar shade system (Figg. 3, 4), made of quadrangular acrylic elements capable of shape shifting, opening and closing, if subjected to thermal stress (Kretzer and Rossi, 2012); the Living's Kinetic Glass, made with plastic modular elements cured with urethane and integrated with a shape memory alloy, responsive to the CO₂ (Yoneda, 2007).

Finally, among low environmental impact kinetic materials we have to mention wood. With thanks to its anisotropic nature, it can deform, naturally flex if subjected to hygroscopic stresses. Elements of various shapes and sizes, but characterized by reduced thickness, can be integrated into vertical and horizontal facade systems to control, independently or through actuators, natural ventilation, heat transmission or incident solar radiation (Fig. 5). In recent years, the possibility of manipulating wood has led to develop special composite systems in the laboratory, in which layers of moisture-sensitive wood material are alternated with synthetic fibres, such as PTFE, with the aim to limit the delamination of the material over time and its consequent aesthetic and mechanical deterioration (Wood et alii, 2016). Finally, the possibility of using three-dimensional modelling and 3D printing systems made it possible to integrate BIPV photovoltaic cells (Fig. 6) with laminated veneer lumber, capable of interacting with the external environment not only to shade transparent surfaces but also and mostly to produce energy (Mazzucchelli et alii, 2018).

Thermal Materials | They are mostly transparent or translucent materials, that thanks to their intrinsic characteristics can modulate trans-

ferring heat flows, optimizing the thermo-hygro-metric performance of opaque transparent envelopes, in terms of thermal insulation, throughout the year. The electrochromic, thermochromic and photochromic glasses belong to this group of smart materials. They can change colour, transparency and reflectance if subjected to natural or induced (by electrical stimuli thermal stress), consequently limiting glare and overheating phenomena in the building. These materials were created for the automotive sector but are now being quite used also in the building sector (Romano, 2010).

Over the last few years, some trials have been carried out on the possibility to create in the laboratory transparent nano-structured stratigraphies to make a heat transfer fluid flow – which can be used to heat or cool the confined space. This is the case of the Microfluidic Glass project (Fig. 7) developed by M. Alston. Thanks to a network of micro-connectors and tubular terminations, it behaves like a radiant wall system powered by incident solar radiation (Alston, 2015).

Transparent insulation materials (TIMs), aerogels and phase-change materials (PCMs) belong to the category of thermal materials. TIMs – patented for the first time in Germany in the 1980s with the acronym TWD – consist of plastic or glass elements, transparent in the visible and near-infrared. These materials are characterized by a honeycomb capillary structure, inspired by the biological structure of the polar bear fur. Thanks to their particular material and geometric composition, they allow to reduce exchange of solar radiation and to save the convective air flows in them, transforming them into heat. TIMs can be classified according to the geometry of the material they are made of – parallel or perpendicular to the glass surface – and their ability to guarantee solar transmittance. Direct solar gain panels, made with parallel fibres between one and two millimetres thick, have an excellent insulating capacity and were the subject of interesting experiments made by the architect T. Herzog who has widely used them in many of his projects (Herzog, Krippner and Lang, 2017).

The aerogels are made of silica particles whose spatial arrangement is obtained through particular production processes. One of the most important physical characteristics of these materials is the low density, since about 96% of the material is made of air while only 4% is made with a silicon dioxide matrix. Thanks to their reduced specific weight (3 kg/m³) and their low thermal conductivity (0.1-0.2 W/mK), the aerogels are suitable for various uses in architecture, helping to improve the thermal insulation performance of multi-layer curtain wall systems. The creation of the prototypes of this material started in the 1930s when S. Kistler thought of removing the liquid from a block of gel, without modifying the solid part.

After further experiments, the liquid component was replaced with air, creating a material with great qualities and a reduced specific weight. Thanks to these measures, the production process of the aerogels has become cheaper and safer, and with a lower environmental impact. Currently, aerogels are produced in granu-

lar or monolithic forms and are integrated transparent façade components in which the material is encapsulated between two glass surfaces sealed with a metal casing with thermal break, ensuring good thermal and solar transmittance performances (Romano, 2010).

Finally, among the thermal smart materials that have become highly diffused in the building industry over the last decades, we have to mention the PCMs, patented in the 1980s by NASA and used as insulating materials capable of ensuring good insulation performances and thermal inertia, thanks to their ability to store and release heat in the solid-liquid phase transition (Memon, 2014). These materials are versatile and are suitable for various uses at building scale. Thanks to the ability to change their molecular geometry according to external thermal stresses, PCMs are particularly suitable to be used even in temperate climates – for example in southern Europe – where they maintain a good thermal inertia even in summer. Among the opaque vertical closing technological solutions analysed in the COST research, it emerges that PCMs are often used as passive storage systems of heat energy and are mainly used in the design of 'solar walls'.

This is the case of the Solar XXI façade systems (Fig. 8), patented by the Portuguese Research Centre Lneg (Aelenei et alii, 2014), and SELFIE, developed within the homonymous national research by the Interuniversity Research Centre ABITA in Florence (Gallo and Romano, 2018). In both examples, the façade stratigraphy shows an air gap between the external envelope (made with a photovoltaic panel) and the layer in which the PCM is integrated. The air grids placed on the external surface of the façade system allow to control the speed and the internal temperature of the air in the gap, helping to improve the performance of the photovoltaic panel during summer and the dynamic behaviour of PCM panel, that can accumulate heat during the day and release it in the environment (partially by radiation and partially by convection) at a lower temperature during the night.

In underfloor heating or radiant heating and cooling systems, the use of PCMs can reduce the overheating of horizontal surfaces directly exposed to solar radiation, stabilizing the temperature of the material within a range close to its melting point. In these uses, the PCM can absorb and store excess energy (due to incident solar radiation or internal heat gains) which would otherwise cause the overheating of the confined space. The energy stored by the material can then be reused to heat the building or can be removed with a hydronic system.

The versatility of the material allows to use it to create also transparent closing components: such as the façade systems patented by the German company Glassx (Fig. 9). The modules are developed as a transparent closing system made of four glass sections and three vacuums: the first is helium selective, the second is insulating and the third is saturated with PCMs. This innovative façade system gives the building a changeable and dynamic aspect, thanks to the different colour the hydrated salts get during the change phase.

Conclusions | The analysis carried out shows that smart materials and adaptive façades have been the object of a technological innovation process, which has allowed to start and test new products, shading and insulating, with thermo-hygrometric and hygroscopic performances – similar to the ones of human beings – capable of adapting to variable boundary conditions throughout the year to ensure real-time indoor comfort. Furthermore, it is clear that the current experiments aim to introduce pre-assembled dry, light and resistant solutions in the building industry, which can be quickly customizable through parametric design and digital manufacturing processes, ensuring ener-

gy and environmental performances, especially in temperate and warm climate zones. Many of the materials dealt with in the paper have been created to shade indoor or outdoor glass surfaces, or to increase the thermal inertia of opaque and transparent envelope components, reducing summer indoor overheating.

If, on the one hand, PMCs, TIMs and some types of selective and electrochromic glasses have clearly overcome the experimentation phase, on the other, many kinetic or aerogel materials, are still being tested as prototypes. However, the progress observed over the last few years in terms of technology transfer from apparently distant scientific industries (such as

physics, space engineering, chemistry, information technology, etc.) to the architecture industry, will soon allow us to close this gap, even facilitating the creation of a new generation of materials with intrinsic intelligence, capable of evolving, self-cleaning and self-repairing, contributing to the creation of organic and resilient architectures, starting from the microscale, in harmony with man and nature.

Acknowledgements

The COST TU 1403 Adaptive Façade Network research was financed by the European Community as part of the program COST – European Cooperation in Science and Technology Program. The Author wants to thank all the participants of Working Group 1, who contributed to the creation of the database of adaptive façade systems, allowing the Author to broaden her knowledge on smart façade systems.

References

- Addington, D. M. and Schodek, D. L. (2005), *Smart Materials and New Technologies – For the architecture and design professions*, Architectural Press, Oxford. [Online] Available at: bintian.files.wordpress.com/2013/01/smart-materials-new-technologies-for-the-architecture-design-professions.pdf [Accessed 11 April 2020].
- Aelenei, D., Aelenei, L., Loonen, R., Perino, M. and Serra, V. (2019), “Adaptive facades”, in Asdrubali, F. and Desideri, U. (eds), *Handbook of Energy Efficiency in Buildings – A Life Cycle Approach offers a comprehensive and in-depth coverage of the subject with a further focus on the Life Cycle*, Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 384-411. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-0-12-812817-6.00039-5 [Accessed 11 April 2020].
- Aelenei, L., Aelenei, D., Romano, R., Mazzucchelli, E. S., Brzezicki, M. and Rico-Martinez, J. M. (2018), *Case Studies – Adaptive Façade Network*, TU Delft Open for the COST Action 1403 Adaptive Façade Network, Delft. [Online] Available at: tu1403.eu/wp-content/uploads/Vol-3-1_for-web-Open-Access-9789463661102.pdf [Accessed 11 April 2020].
- Aelenei, L., Pereira, R., Ferreira, A., Gonçalves, H. and Joyce, A. (2014), “Building Integrated Photovoltaic System with Integral Thermal Storage: A Case Study”, in *Energy Procedia / Renewable Energy Research Conference – RERC 2014*, pp. 172-178. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.425 [Accessed 11 April 2020].
- Alston, M. E. (2015), “Natures Building as Trees: Biologically Inspired Glass as an Energy System”, in *Optics and Photonics Journal*, vol. 4, n. 5, pp. 136-150. [Online] Available at: dx.doi.org/10.4236/opj.2015.54013 [Accessed 11 April 2020].
- Correa, D. and Menges, A. (2017), “Fused filament fabrication for multi-kinematic-state climate-responsive aperture”, in Menges, A., Sheil, B., Glynn, R. and Skavara, M. (eds), *Fabricate 2017*, UCL Press, pp. 190-195. [Online] Available at: dx.doi.org/10.2307/j.ctt1n7qkg7.30 [Accessed 11 April 2020].
- Del Grosso, A. E. and Basso, P. (2010), “Adaptive building skin structures”, in *Smart Materials and Structures*, vol. 19, n. 12, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1088/0964-1726/19/12/124011 [Accessed 11 April 2020].
- Gallo, P. and Romano, R. (2018), “The SELFIE façade system. From Smart Buildings to Smart grid”, in *Techne | European Pathway for the Smart Cities to come on behalf of EERA Joint Programme on Smart Cities*, special series, vol. 1, pp. 166-172. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-22702 [Accessed 11 April 2020].
- Hawkes, E., An, B., Benbernou, N. M., Tanaka, H., Kim, S., Demaine, E. D., Rus, D. and Wood, J. R. (2010), “Programmable matter by folding”, in *PNAS – Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, vol. 107, n. 28, pp. 12441-12445. [Online] Available at: doi.org/10.1073/pnas.0914069107 [Accessed 11 April 2020].
- Herzog, T., Krippner, R. and Lang, W. (2017), *Facade Construction Manual*, 2nd edition, Detail Business Information GmbH, Munich.
- Juaristi, M., Gómez-Acebo, T. and Monge-Barrio, A. (2018), “Qualitative analysis of promising materials and technologies for the design and evaluation of Climate Adaptive Opaque Façades”, in *Building and Environment*, vol. 144, pp. 482-501. [Online] Available at: dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.028 [Accessed 11 April 2020].
- Kretzer, M. and Rossi, D. (2012), “ShapeShift”, in *Leonardo*, vol. 45, n. 5, pp. 480-481.
- Luible, A. and Overend, M. (2018), “COST Action TU1403 – Adaptive Facades Network”, in Luible, A. and Gosztonyi, S. (eds), *Facade 2018 - Adaptive! | Proceedings of the COST Action TU1403 – Adaptive Facades Network Final Conference, Lucerne University of Applied Sciences and Arts Lucerne, Lucerne Switzerland, 26-27 November 2018*, TU Delft Open, pp. 19-23. [Online] Available at: tu1403.eu/wp-content/uploads/COST_endconference2018_webversion.pdf [Accessed 11 April 2020].
- Mazzucchelli, E. S., Alston, M., Brzezicki, M. and Doniacovo, L. (2018), “Study of a BIPV Adaptive System: Combining Timber and Photovoltaic Technologies”, in *Journal of Façade Design and Engineering*, vol. 6, n. 3, pp. 149-162. [Online] Available at: doi.org/10.7480/jfde.2018.3.2602 [Accessed 11 April 2020].
- Memon, S. A. (2014), “Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review”, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 870-906. [Online] Available at: dx.doi.org/10.1016/j.rsre.2013.12.042 [Accessed 11 April 2020].
- Pesenti, M., Maserà, G. and Fiorito, F. (2018), “Exploration of Adaptive Origami Shading Concepts through Integrated Dynamic Simulations”, in *Journal of Architectural Engineering*, vol. 24, issue 4, pp. 1-14.
- Reichert, S., Menges, A. and Correa, D. (2014), “Me-teorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness”, in *Computer-Aided Design*, vol. 60, pp. 50-69. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.010 [Accessed 11 April 2020].
- Romano, R. (2010), *Smart Skin Envelope – Integrazione architettonica di tecnologie dinamiche e innovative per il risparmio energetico*, Firenze University Press, Firenze. [Online] Available at: www.fupress.com/archivio/pdf/5056.pdf [Accessed 11 April 2020].
- Velikov, K. and Thün, G. (2013), “Responsive Building Envelopes: Characteristics and evolving paradigms”, in Trubiano, F. (ed.), *Design and Construction of High-Performance Homes – Building Envelopes, Renewable Energies and Integrated Practice*, Routledge, pp. 75-92. [Online] Available at: rvtr.com/files/HPH.pdf [Accessed 11 April 2020].
- Wood, D. M., Correa, D., Krieg, O. D. and Menges, A. (2016), “Material Computation – 4D Timber Construction: Towards Building-Scale Hygroscopic Actuated, Self-Constructing Timber Surfaces”, in *International Journal of Architectural Computing*, vol. 14, issue 1, pp. 49-62. [Online] Available at: doi.org/10.1177/1478077115625522 [Accessed 11 April 2020].
- Yoneda, Y. (2007), *Interactive Living Glass regulates air quality*. [Online] Available at: inhabitat.com/carbon-dioxide-sensing-living-glass/ [Accessed 11 April 2020].