

Integrated envelope design process: innovative materials and technologies for a sustainable refurbishment of the existing building stock

Cecilia Mazzoli^{a*}, Nicola Bartolini^a

^a CIRI Edilizia e Costruzioni, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, Bologna, 40136, Italia

Highlights

A new integrated design process for the refurbishment of the building envelope was investigated. The solution proposed is based on the production of prefabricated panels by 3D Printing, whose morphology optimizes the tessellation of the whole façade surface of the existing buildings. These panels can renovate both the architectural feature and the energy performances, through the use of a new sustainable thermal material included in it. Different formulations of this new class of Alkali Activated Materials (AAM) were explored, in order to tune an innovative thermal insulation material for external use, obtained by the recycle of brick waste.

Abstract

The research project seeks to investigate and promote a new energy efficient architectural strategy for the refurbishment of existing building stock, by proposing innovative and sustainable envelope solutions based on process by-products concept and bio-mimetic approach. The project aims optimizing the exploitation of innovative sustainable materials and technologies to develop a continuous and adaptive façade system that could guarantee high performance, by using a new class of materials (AAM), obtained through the alkali-activation process of ceramic industrial waste.

Keywords

Sustainable refurbishment, Integrated design process, Adaptive envelope, AAM - Alkali Activated Material, Thermochromic coating

1. INTRODUZIONE

La riqualificazione del patrimonio edilizio esistente rappresenta una delle pratiche maggiormente frequenti e complesse all'interno degli interventi attualmente affrontati dal settore delle costruzioni, rappresentandone il 60% e sollevando tematiche rilevanti non soltanto in termini funzionali e architettonici, bensì anche prestazionali energetici.

In un'ottica di sostenibilità, il riuso e recupero degli edifici esistenti acquisisce un ruolo fondamentale in questo contesto, evidenziando come un edificio con una lunga durabilità e riusabilità possa corrispondere a un'alta produttività a lungo termine delle risorse. Infatti, la riqualificazione energetica contribuisce non soltanto alla riduzione dei consumi di risorse e materie prime, che nella maggior parte degli edifici esistenti hanno raggiunto soltanto metà del loro ciclo di vita, ma anche all'estensione della loro durabilità e funzionalità nel corso del tempo. Inoltre, questa tipologia di interventi consente di evitare gli elevati costi legati all'energia primaria di demolizione e ricostruzione.

Nella maggior parte degli edifici esistenti realizzati durante gli ultimi cinquant'anni, specialmente in quelli in conglomerato cementizio armato e muratura, sono riscontrabili frequenti punti di discontinuità nell'involucro edilizio, comportando notevoli carenze prestazionali, in termini di isolamento termico e di tenuta all'aria. Tali

* Corresponding author. Tel.: +39-338-897-4984; e-mail: cecilia.mazzoli2@unibo.it

punti di dispersione sono dovuti a fenomeni di trasmissione del calore, ventilazione e infiltrazione d'aria attraverso l'involucro, stimati quantitativamente grazie allo svolgimento di test e misurazioni delle proprietà termofisiche (stazionarie e dinamiche), fra cui la trasmittanza termica U dei muri perimetrali, il cui limite è stato ridotto di due terzi negli ultimi vent'anni, passando da $0,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}$ a $0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}$.

Questi aspetti prestazionali devono essere correlati con i requisiti imposti dalle attuali normative per l'adeguamento dei parametri ai valori standard stabiliti e deve essere inevitabilmente riferito al dominio della tecnica, attraverso i contributi offerti dall'innovazione scientifica. La presente ricerca condotta dal *CIRI - Edilizia e Costruzioni* dell'Università di Bologna è finalizzata ad esplorare, ottimizzare e promuovere materiali e tecnologie innovative per la riqualificazione energetica degli edifici esistenti, mediante l'introduzione di nuovi strumenti e metodi per la progettazione di soluzioni di involucro "su misura", in funzione delle differenti specificità tipologico-costruttive.

2. STATO DELL'ARTE

La ricerca presenta un nuovo approccio integrato, a supporto di operatori e progettisti, per la gestione dell'intero processo progettuale degli interventi di riqualificazione energetica e architettonica del patrimonio edilizio recente, mediante l'impiego di soluzioni tecnologiche innovative di involucro, atte a garantire esiti prestazionali soddisfacenti.

Lo studio individua e propone procedimenti costruttivi ecocompatibili per la progettazione di componenti prefabbricati di involucro attivo, adattabile ed efficiente, da assemblare a secco, nel rispetto dei requisiti prestazionali richiesti dalle attuali normative. La ricerca è finalizzata alla gestione dell'intero processo, supportato da sistemi di rilevazione geometrica, collegati a software di programmazione parametrica per la modellazione di superfici adattabili alla morfologia dei fabbricati esistenti, oggetto di intervento. Tali strumenti informatizzati CAD-CAM sono connessi a macchine a controllo numerico CNC per la produzione industrializzata dei componenti di facciata. A titolo esemplificativo dell'approccio innovativo proposto, si formula una possibile soluzione di involucro in linea con i paradigmi della ricerca, nel rispetto dei principi di sostenibilità, intesa come modularità, rapidità di posa, reversibilità, recupero e riciclo di materiali.

Basato su un approccio biomimetico, il progetto si dedica all'elaborazione di materiali e tecniche innovative per sviluppare un sistema continuo di involucro ad alte prestazioni, basato sull'impiego di una nuova classe di materiali, chiamata *AAM - Alkali Activated Materials*, ottenuti dal riciclo e riutilizzo di scarti ceramici di lavorazione. In particolare, la soluzione innovativa proposta è caratterizzata dall'applicazione di una tecnica basata sull'assemblaggio a secco di elementi prefabbricati, dall'adozione di una trama esagonale per la tassellazione della nuova superficie di facciata e dall'utilizzo di un nuovo materiale termico isolante.

Questo materiale plastico e inorganico, recuperato e riciclato, ecosostenibile e a basso impatto ambientale, presenta notevoli proprietà fisiche, meccaniche e termiche. L'aspetto innovativo maggiormente rilevante che caratterizza questo studio consiste nell'utilizzo dello scarto di laterizio polverizzato come materia prima, al posto del comune metacaolino, combinato con una soluzione alcalina e con agenti aeranti [1]. Mediante questo

processo di attivazione alcalina, svolto a temperatura ambiente, si ottiene un materiale a ridotto impatto ambientale, composto principalmente da materia riciclata e da attivanti alcalini a basso costo.

Differenti formulazioni sono state elaborate, variando il rapporto molare degli ossidi impiegati (SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O) direttamente coinvolti nel processo di attivazione alcalina, al fine di ottimizzare la lavorabilità e la densità del prodotto finale. La versatilità del materiale oggetto di studio offre diverse applicazioni in ambito di efficientamento energetico mediante addizione in facciata: spruzzo su superfici di involucro, stesura analoga a quella di un tradizionale cemento o malta, getto all'interno di stampi per la produzione di piastrelle o mattoni, o ancora getto all'interno di casseforme a perdere per la creazione di pannelli prefabbricati.

L'approccio biomimetico proposto è volto a promuovere la progettazione architettonica di un nuovo tipo di involucro dal ruolo di filtro attivo che, grazie alla sua composizione costruttiva, sia in grado di interagire sinergicamente con l'ambiente circostante, al fine di conseguire buoni livelli di prestazioni termiche e comfort abitativo. Così come l'epidermide consente agli animali di respirare e autoregolare la propria temperatura corporea, l'involucro architettonico rappresenta l'elemento costruttivo fondamentale per favorire il dialogo attivo tra gli ambienti che esso delimita [2].

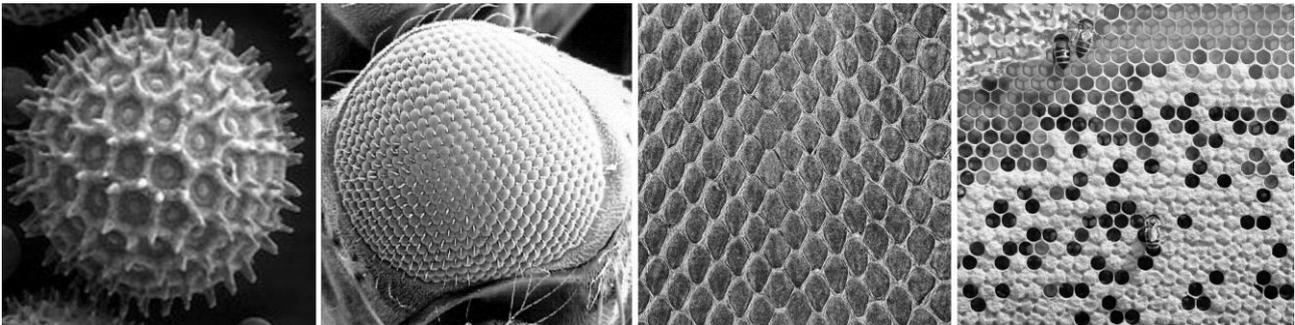


Figura 1. Esempi di forme esagonali in natura: grani di polline, tessuto oculare delle mosche, epitelio dei rettili, alveare delle api.

Il comportamento termico del componente di facciata viene ottimizzato mediante l'introduzione di uno strato di finitura ultima in vernice termocromica, applicato esternamente al pannello prefabbricato isolante e massivo costituente il sistema a cappotto. Questa soluzione architettonica impiegata per gli interventi di riqualificazione energetica può contribuire significativamente a innalzare il livello di efficienza energetica dell'involucro oggetto di intervento, conferendo un'ampia e controllata variabilità delle proprietà ottiche, e dunque termiche, durante il ciclo giorno-notte ed estate-inverno. Infatti, grazie alle sue proprietà fisiche dinamiche, durante l'inverno, il rivestimento termocromico assumerebbe una colorazione più scura che consentirebbe di assorbire la radiazione solare e, dunque, di accumulare energia termica; durante l'estate, invece, diventerebbe più chiara, permettendo all'involucro di riflettere la radiazione solare e, quindi, di abbassare la temperatura superficiale, migliorando il benessere abitativo interno.

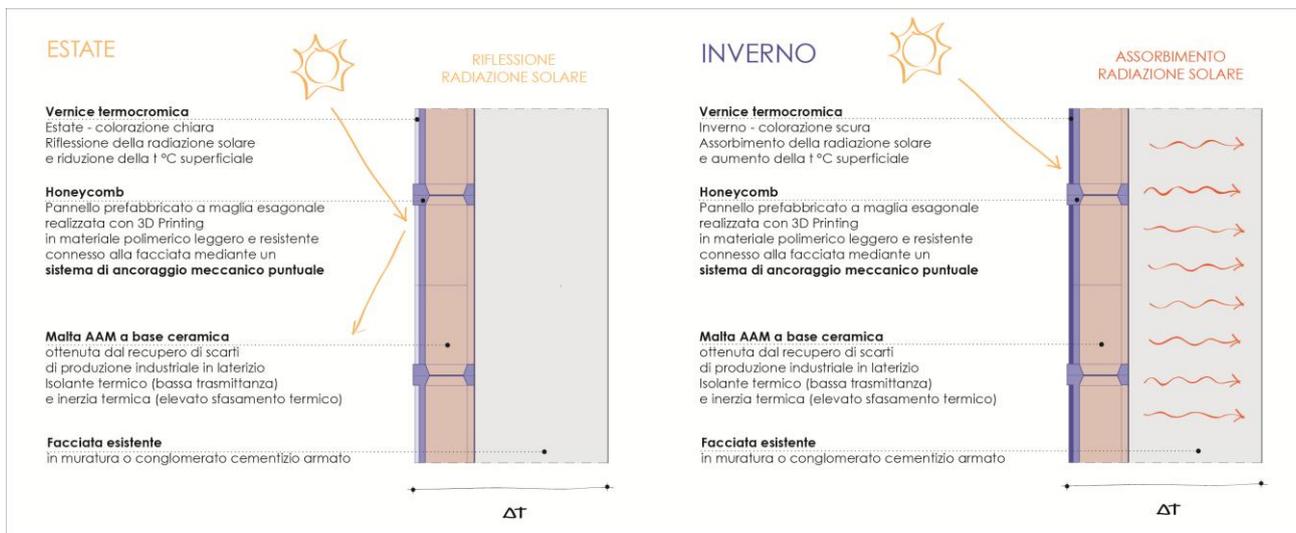


Figura 2. Schema rappresentativo del comportamento dinamico conferito al sistema di involucro proposto dallo strato "attivo" di vernice termocromica, durante il regime estivo e invernale.

3. METODOLOGIA

La soluzione progettuale proposta è affrontata secondo un protocollo scientifico, all'interno del quale teoria e pratica sono indissolubilmente legate fra loro, suddiviso nelle seguenti quattro fasi:

- (i) *Acquisizione di un repertorio selezionato di sistemi costruttivi di involucro*, come base di partenza per l'elaborazione di soluzioni progettuali di recupero del patrimonio edilizio recente, appartenente al secondo dopoguerra, prevalentemente prefabbricato in conglomerato cementizio armato o in muratura.
- (ii) *Progettazione del componente "attivo" di facciata*, in accordo con i paradigmi di ricerca e con le normative vigenti, per ottenere un nuovo involucro dotato di elevate proprietà di efficienza energetica e qualità estetico-architettoniche. Questa fase progettuale è svolta mediante software di progettazione parametrica che, a partire dal modello dello stato di fatto, ottenuto dalla fase preliminare di rilievo geometrico con laser scanner, offrono la possibilità di modellare superfici "su misura", controllando la totalità dei parametri morfologici e climatici coinvolti nel processo, consentendo di interfacciarsi con macchine per la produzione industrializzata degli elementi costruttivi.
- (iii) *Analisi termica e meccanica* della soluzione di facciata proposta, tramite l'implementazione di misurazioni e simulazioni svolte su modelli virtuali, ottenuti precedentemente tramite l'uso di software di progettazione parametrica. Le proprietà del materiale innovativo studiato sono definite sulla base dei dati ottenuti dalla fase di sperimentazione costruttiva svolta sui prodotti geopolimerici AAM.
- (iv) *Comparazione dei risultati* ottenuti dalle analisi numeriche con quelli provenienti dalle misurazioni e dai test svolti sui modelli reali, realizzati in seguito alla fase di sperimentazione costruttiva e prototipazione, fondamentale ai fini della verifica dei requisiti prestazionali e delle tecniche di messa in opera e, dunque, necessario per la validazione del sistema proposto.

4. RISULTATI

Lo studio propone una metodologia progettuale di involucro architettonico attivo, basata sullo studio parametrico morfologico, a livello di componente locale e di gruppo, in cui geometria e forma strutturale rivestono un ruolo fondamentale [3]. Tale involucro a comportamento “dinamico” è definito da una stratificazione di materiali che, per composizione, dimensionamento e relative variazioni delle proprietà e dei principi di sostenibilità che lo identificano, possono caratterizzare soluzioni costruttive che rispondano al meglio ai requisiti prestazionali. L’aspetto interessante concerne la variabilità, ossia la “dinamicità”, della composizione del pacchetto costruttivo in funzione dell’orientamento e dell’articolazione interna.

Il progetto di ricerca propone un “sistema di involucro continuo” [4], inteso come seconda pelle in grado di adattarsi alla volumetria esistente, costituita da pannelli prefabbricati a trama esagonale estrusa, realizzati in materiale polimerico mediante *3D Printing* e connessi alla facciata esistente tramite ancoraggio meccanico puntuale, con il duplice ruolo di conferire rigidità per forma alla struttura bidimensionale, e di fungere da cassaforma a perdere per il contenimento del getto di materiale isolante plastico.



Figura 3. Simulazione del processo di prefabbricazione, assemblaggio a secco e posa in opera dei pannelli.

La forma geometrica della struttura leggera e resistente, costituita da celle esagonali – forma ampiamente diffusa in natura – presenta elevati potenziali per la modulazione di superfici di facciata, consentendo di ottenere una ottimizzazione spaziale corrispondente con la tassellazione completa dello spazio euclideo, in accordo con il principio dell’impacchettamento compatto (*closest packing*). Il più comune esempio di impacchettamento compatto, e certamente l’espressione più affascinante e sublime, è la struttura dell’alveare delle api: questo sistema, costituito da una maglia esagonale, permette di immagazzinare la maggiore quantità di miele con il minimo utilizzo di materiale di cera, attraverso l’utilizzo di una struttura realizzabile mediante il minimo impiego di energia [5]. Inoltre, dal punto di vista meccanico, la geometria esagonale del pannello offre la possibilità di ottenere un particolare sistema di incastro tra i pannelli e, dunque, una riduzione dei sistemi di connessione tra i componenti e tra i pannelli stessi e la facciata esistente, con conseguenze benefiche anche in termini di riduzione dei ponti termici e di discontinuità.

Il materiale isolante innovativo AAM da integrare all'interno del pannello di facciata deriva dal riciclo di polveri provenienti da scarti di produzione del laterizio, combinate con una soluzione alcalina attivatrice contenente un materiale siliceo a base vitrea. Si tratta, infatti, di un materiale dotato di buone proprietà termiche e meccaniche, oltre che di un'elevata resistenza agli agenti esterni. Una delle proprietà più innovative di questo prodotto, inoltre, riguarda la notevole riduzione delle emissioni di anidride carbonica, dovuta sia allo svolgimento a temperatura ambiente della produzione e dell'essiccamento del getto, sia all'eliminazione della produzione di CO₂ legata alla calcinazione del caolino, grazie all'utilizzo di una materia prima già cotta [6]. Ulteriori sviluppi della ricerca sono attualmente in corso, al fine di caratterizzare definitivamente il materiale AAM studiato, in termini di proprietà meccaniche e fisiche.

In linea con l'obiettivo primario di realizzare un involucro attivo, per ogni pannello si prevede l'applicazione di uno strato ultimo di finitura in vernice termocromica. Per questi dispositivi cromogenici, uno dei maggiori problemi riguarda la fotodegradazione dei pigmenti termocromici che, se esposti alla radiazione solare, perdono la capacità di reversibilità delle loro proprietà ottiche [7].

5. CONCLUSIONI

La ricerca fin qui sviluppata volge alla definizione, secondo un approccio olistico, di un sistema di involucro capace di rispondere alle esigenze estetiche, funzionali e prestazionali, proprie al tema della riqualificazione degli edifici appartenenti al patrimonio edilizio recente. Il carattere innovativo risiede nell'approccio qui proposto, che consente di rispondere ai requisiti di adattabilità e sostenibilità dell'intervento attraverso la l'adozione della progettazione parametrica, capace di considerare tutti i fattori che contribuiscono alla definizione del comportamento reale della soluzione proposta. Le ricerche in corso si dedicano all'ottimizzazione della formulazione del materiale isolante innovativo AAM e della vernice termocromica per esterni, non ancora presenti sul mercato. I futuri sviluppi della ricerca prevedono l'approfondimento, mediante prototipazione, delle conoscenze relative alle caratteristiche prestazionali fisico-meccaniche di questi materiali attraverso l'esplorazione di differenti metodi di microincapsulamento dei pigmenti per la protezione dalla radiazione solare, al fine di impedirne la fotodegradazione.

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] V. Vaou, D. Panias, Thermal insulating foamy geopolymers from perlite, Elsevier Science - Minerals Engineering, Vol. 23, Issue 14 (November 2010) 1146-1151.
- [2] G. Chiesa, Biomimetica - tecnologia e innovazione per l'architettura, Celid, Beinasco (Torino), 2010.
- [3] M. Hensel, A. Menges, M. Weinstock, Emergent Technologies and Design. Toward a biological paradigm for architecture, Routledge, London, 2010.
- [4] T. Herzog, R. Krippner, W. Lang, Façade Construction Manual, Birkhäuser Edition Detail, Basel, 2004.
- [5] P. Pearce, Structure in nature is a strategy for Design, The MIT Press, Cambridge (Massachusetts), 1990.
- [6] C. Mazzoli, O. Fusco, L. Guardigli, R. Gulli, Innovative materials and technologies for a new envelope system in the sustainable refurbishment of existing building stock, Atti del Convegno CESB13 - Central Europe towards Sustainable Building 2013, Tiskarna PBtisk, Praga (Repubblica Ceca) (2013) 405-408.
- [7] T. Karlessi, M. Santamouris, K. Apostolakis, A. Synnefa, I. Livada, Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures, Solar Energy 83 (2009) 538-551.