

# Innovative, Translucent and Multi-functional Components for the Building Envelope: technological and performance optimization

Rossella Corrao\*, Marco Morini

## Highlights

Improvement of the energy performance of innovative building component (patented by the authors) for façades and roofs able to reduce building energy consumption and to produce clean electricity from the sun. Design optimization of sub-components used to dry assemble translucent multifunctional panels made of precast and pre-stressed innovative glass blocks integrated with 3rd-generation PV technology. Adaptation of the initial configuration of the component to simplify the production process, both in the prototyping and commercialization phases as well as to speed up the assembling operations for a reduction of construction times and costs.

## Abstract

The paper describes the actions aimed at the technology and performance optimization of an innovative, multi-functional building component made of precast and pre-stressed glass blocks useful for the construction of sustainable building envelopes able to reduce the energy consumption and to produce clean energy from the sun. The design optimization of different sub-components and the choice of the right materials for guaranteeing their good response in terms of mechanical resistance, thermal and acoustic insulation, light transmission, electricity production, integration with other components, dimensional coordination, are particularly described.

## Keywords

Building Integrated Photovoltaics (BIPV), Glass Block, Dry Assembly System, Multifunctional Building Components, Third generation PV technology

## 1. INTRODUCTION

The reduction of building energy consumption, in each phase of their life cycle (from material production to their realization, management, and disposal) represents one of the main challenges for the achievement of the goals set at the national and international levels for the reduction of greenhouse gas emissions in the atmosphere. In Europe, for example, the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) established that, by December 31<sup>st</sup>, 2020, all new buildings will have to be nearly Zero Energy Buildings (nZEB) i.e. their nearly zero or very low needs in terms of energy should be covered to a very significant extent by energy from renewable sources, including energy from renewable sources produced on-site or nearby [1]. The directive has been translated into a series of national measures that have imposed stricter and stricter performance standards for the technical elements of the building

### Rossella Corrao

*D'ARCH - Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Palermo, viale delle Scienze, ed. 8, Palermo, 90128, Italia.*

*SBskin. Smart Building Skin s.r.l., via Ponte di Mare 91, Palermo, 90123, Italia*

### Marco Morini

*SBskin. Smart Building Skin s.r.l., via Ponte di Mare 91, Palermo, 90123, Italia*

*\* Corresponding author  
Tel.: +39-320-4330312;  
fax: +39-91-488562;  
e-mail: rossella.corrao@unipa.it*

envelope. These have also prescribed, for the building design, construction and management phases, a series of actions, which can no longer take out of consideration the aspects linked to the reduction of carbon-based energy consumptions in buildings, be it either in the framework of a new construction or a renovation. For example, in Italy, the Ministerial Decree of June 26<sup>th</sup>, 2015 [2] imposed general criteria in terms of building energy performance not only as regards building technical systems, but also as for envelope components. Considering, for example, the transparent and/or translucent envelope components, including frames, the limit imposed by the Decree in terms of thermal transmittance, or U value, ranges from the value of 1.7 W/m<sup>2</sup>K (in the zone F, where the city of Cuneo belongs) to 3.0 W/m<sup>2</sup>K (in zones A or B, where, respectively, the cities of Porto Empedocle and Palermo belong). As a result, the building industry had to make a remarkable effort to provide higher and higher performance levels in relation to the products for the building envelope whereas, conversely, the building products that were unable to satisfy adequately such mutated requirements had to face a decline in their use. This is the case of the glass block, which is the object of the considerations presented in this work as well as of the research activity carried out by SBskin. Smart Building Skin s.r.l., innovative start-up e academic spin-off of the University of Palermo [3]. The necessity to improve the performance particularly related to the thermal insulation of the product in order to adapt to the existing regulations both at the national and international level, has led to the definition of new product configurations optimized by means of a “thermal belt” and other sub-components able to decrease its thermal transmittance. Moreover, in order to optimize further the energy performance of the product, new configurations, integrated with third-generation photovoltaic devices (Dye-sensitized Solar Cells, DSC), were defined [4]. Contextually, a new totally dry assembly system has been developed, occurring by means of plastic moulded profiles able to replace the cement mortar, traditionally used for the realization of glass block walls/panels as well as to guarantee, with one single operation, the construction of the building envelope and of the photovoltaic system. In this way, multifunctional and precast components are obtained. These are subsequently pre-stressed in order to achieve high values of mechanical resistance, which is a useful operation for the installation of the panels for construction of translucent curtain walls, even those built in high-rise buildings, and for the building of “self-sheltered” roofs thanks to the PV cells that act as energy producers and “sun shading” devices.

The present paper describes the activities linked to the technological optimization and to the performance improvement of these novel components.

## 1. INTRODUZIONE

*La riduzione dei consumi energetici degli edifici, in ogni fase del loro ciclo di vita (dalla produzione dei materiali che li costituiscono, alla loro realizzazione, gestione e, in ultima analisi, alla loro dismissione), rappresenta una delle principali sfide per il raggiungimento degli obiettivi prefissati, a livello nazionale e internazionale, per la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera. In Europa, ad esempio, la Direttiva sulle prestazioni energetiche degli edifici ha stabilito che entro il 31 dicembre del 2020, tutti i nuovi edifici dovranno essere a energia quasi zero (nearly Zero Energy Buildings, nZEB), ossia con una richiesta vicina allo zero da coprire, nella più ampia misura possibile, con energia prodotta da fonti rinnovabili, in situ o nelle immediate vicinanze dell'edificio [1]. Tale direttiva è stata tradotta in una serie di misure a livello nazionale che hanno imposto standard prestazionali sempre più stringenti per gli elementi tecnici dell'involucro edilizio e che hanno prescritto azioni da intraprendere in fase di progettazione, costruzione e gestione dell'edificio che non possono più prescindere dagli aspetti connessi alla riduzione dei consumi di energia fossile. Ad esempio il DM del 26/06/2015 [2] ha imposto una serie di criteri generali relativi alle performance energetiche degli edifici, individuando anche i limiti prestazionali relativi agli impianti ed agli elementi tecnici dell'involucro edilizio. Per quanto riguarda, in particolare, le chiusure trasparenti e/o traslucide, comprensive di infissi, il limite imposto dal Decreto in termini di trasmittanza termica, o U value, varia dal valore di 1.7 W/m<sup>2</sup>K (in zona F, di cui ad esempio fa parte la città di Cuneo) a 3.0 W/m<sup>2</sup>K (in zona A o B, di cui ad esempio fanno parte, rispettivamente, le città di Porto Empedocle e Palermo). L'industria edilizia ha dovuto fare uno sforzo importante per garantire livelli di prestazione sempre più elevati in relazione ai prodotti e agli elementi tecnici che connotano l'involucro mentre, di contro, i prodotti edilizi non in grado di soddisfare adeguatamente i requisiti connotanti le diverse classi di esigenza dell'utenza sono progressivamente caduti in disuso. È il caso del vetromattone oggetto delle considerazioni presentate all'interno del presente lavoro e dell'attività di ricerca e sviluppo svolta dalla SBskin. Smart Building Skin s.r.l., start up innovativa e spin off accademico dell'Università di Palermo [3]. La necessità di migliorarne le prestazioni connesse, in particolare, all'isolamento termico, allo scopo di adeguarlo ai parametri imposti dalle normative vigenti a livello nazionale ed internazionale, ha portato alla definizione di nuove configurazioni del prodotto, ottimizzate attraverso l'utilizzo di una “cintura termica” e altri sub-componenti in grado di abbattere il valore di trasmittanza. Allo scopo di incrementarne ulteriormente l'efficienza energetica, poi, si sono definite nuove configurazioni di vetromattone integrato con celle solari di terza generazione (Dye-sensitized Solar Cells, DSC) [4]. È stato anche sviluppato un sistema di assemblaggio*

The activities are carried out through the modification of the shape of the constituent sub-components and through the selection of the most adapted materials for their realization, in order to provide adequate responses of the assembled component in relation to the 7 essential requirements of building users (safety and comfort, in first place, but also usability, appearance, management, integrability, environmental protection). Moreover, the paper describes the modifications to the sub-components configuration, deriving from the necessity to simplify the production process at the prototyping stage, but also, most importantly, thinking about their commercialization as well as the assembly operations aimed to a more effective reduction of time and costs of construction.

## 2. DESCRIPTION AND PERFORMANCE OPTIMIZATION OF THE MULTIFUNCTIONAL COMPONENT

The multifunctional translucent component in glass blocks (19 x 19 cm) optimised as for the thermal insulation and integrated with DSC modules is illustrated in the drawing at fig. 1 and in the photos in fig. 2.

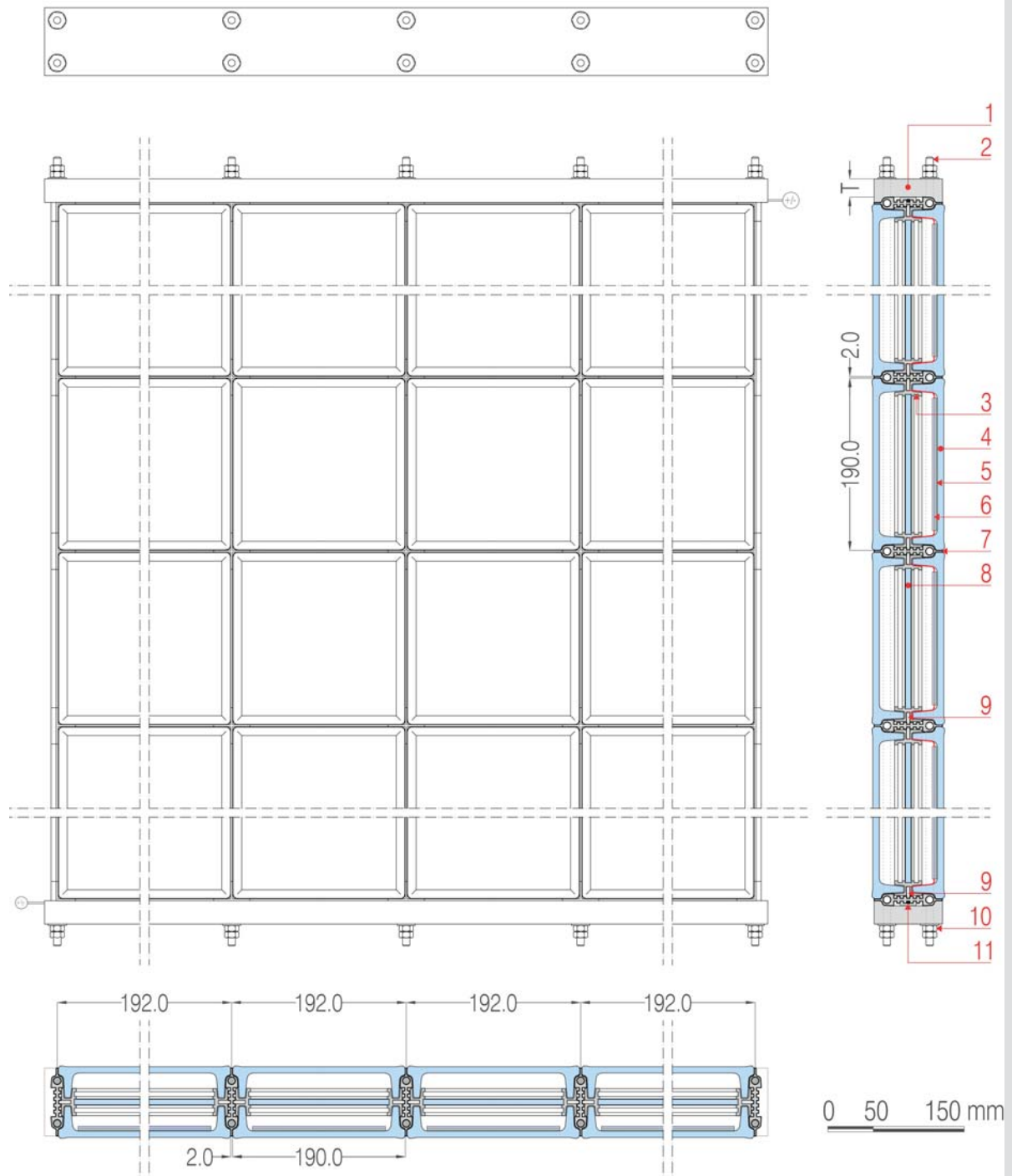
The panel is precast and dry-assembled building component constituted by a supporting structure made of plastic moulded elements (the “profiles” and the “crossings”), placed in the spaces between contiguous glass blocks and provided with holes lengthwise for the passage of the stiffening steel bars. These latter are positioned along the prevailing dimension of the panel, whose standard dimension has been determined by using 75 glass blocks, arranged along 5 “columns” and 15 “rows”, corresponding to a height of about 3,00 m and to a width of around 1,00 m. The bars are subsequently put in tension by using a dynamometric wrench for clamping nuts against two steel plates disposed at the top and the bottom of the panel, in order to apply a pre-stressing force and provide the panel with the desired mechanical resistance values. The profiles present protruding 2 mm thick “wings” at its edges, allowing for the separation of the glass blocks and for the attainment of equally thick joints between them. In order to guarantee the maximum standardization of the items, the profiles that constitute the panel have been optimized as for their dimensions and all are now characterized by a constant dimension, i.e. a length equal to 140 mm, against the initially considered 170 mm (fig. 3).

The elements of intersection between vertical and horizontal profiles are the so-called “crossings”. Three types of crossing were designed according to their position –centre, side or corner– with respect to the panel. These latter have been modified compared to their initial configuration, also in order to reduce the number of moulds needed for their realization.

*interamente a secco, per mezzo di profili in materiale plastico in grado di sostituire la malta di cemento tradizionalmente utilizzata per la realizzazione di pareti e/o pannelli in vetromattoni nonché di garantire la contemporanea realizzazione dell'involucro edilizio e dell'impianto fotovoltaico integrato. In questo modo si sono ottenuti componenti multifunzionali, preassemblati a secco e precompressi per il raggiungimento di elevati valori di resistenza meccanica, utili alla costruzione di pareti perimetrali verticali a cortina, da realizzare anche nel caso di edifici a notevole sviluppo verticale, e per la costruzione di coperture traslucide “autoschermate”, grazie alla presenza delle celle solari che agiscono non soltanto da generatori di energia ma da elementi “frangisole”. Il presente articolo descrive le attività connesse all'ottimizzazione tecnologica e prestazionale del componente – condotte attraverso la modifica della forma dei sub-componenti che lo costituiscono – ed alla scelta dei materiali più adeguati per garantirne una buona risposta in relazione alle 7 classi di esigenza dell'utenza (sicurezza e benessere, in primis, ma anche aspetto, fruibilità, gestione, integrabilità, salvaguardia dell'ambiente). Sono inoltre descritte le modifiche apportate alla configurazione dei pezzi derivate anche dalla necessità di semplificare il processo di produzione degli stessi sia in relazione alla fase di prototipazione che pensando a quella di commercializzazione, nonché le operazioni di assemblaggio dei sub-componenti per una più efficace riduzione dei tempi e dei costi di costruzione degli edifici.*

### **2. DESCRIZIONE E OTTIMIZZAZIONE TECNOLOGICO-PRESTAZIONALE DEL COMPONENTE MULTIFUNZIONALE**

*Il componente multifunzionale traslucido in vetromattoni (19x19cm) ottimizzati dal punto di vista dell'isolamento termico e integrati con moduli DSC è illustrato nel disegno in fig. 1 e nelle immagini in fig. 2. Si tratta di un pannello, preassemblato a secco e precompresso, costituito da una struttura di supporto realizzata tramite elementi sagomati in materiale plastico (i “profili” e le “crocette”), posti fra un mattone e l'altro e provvisti di fori longitudinali per il passaggio delle barre di irrigidimento in acciaio. Queste sono posizionate lungo la dimensione prevalente del pannello la cui dimensione “standard” è stata determinata utilizzando 75 mattoni distribuiti lungo 5 “colonne” e 15 “righe”, corrispondenti ad un pannello con un'altezza di circa 3,00 m ed una larghezza di circa 1,00 m. Le barre sono successivamente tesate per mezzo di una chiave dinamometrica attraverso il serraggio dei dadi stretti contro due piastre in acciaio poste all'estremità superiore ed inferiore del pannello stesso, al fine di imprimere una forza di precompressione che consente al pannello di raggiungere i valori di resistenza meccanica desiderati. I profili sono dotati di due alette dello spessore di 2 mm che permettono di separare i vetromattoni*



**LEGEND**

**1. Load-bearing element**

Shaped steel plate

**2. Stiffening element**

Steel bars  $\varnothing$  8 mm

**3. Thermal insulation element**

Plastic thermal belt

**4. Finishing element**

Glass shell (5mm thick)

**5. Gluing layer**

Resin (glass/glass bonding)

**6. PV production element**

DSC module (6mm thick)

**7. Supporting element**

Moulded plastic profile

**8. Thermal insulation element**

Glass sheet

**9. Electrical connection element (central modules)**

Electrical connector (Cu and Zn alloy) with plastic casing

**10. Clamping element**

Steel Nut

**11. Electrical connection element (side modules)**

Electrical connector with plastic casing

Figure 1. The dry-assembled and multifunctional glass block panel: front and side views, horizontal and vertical cross sections.

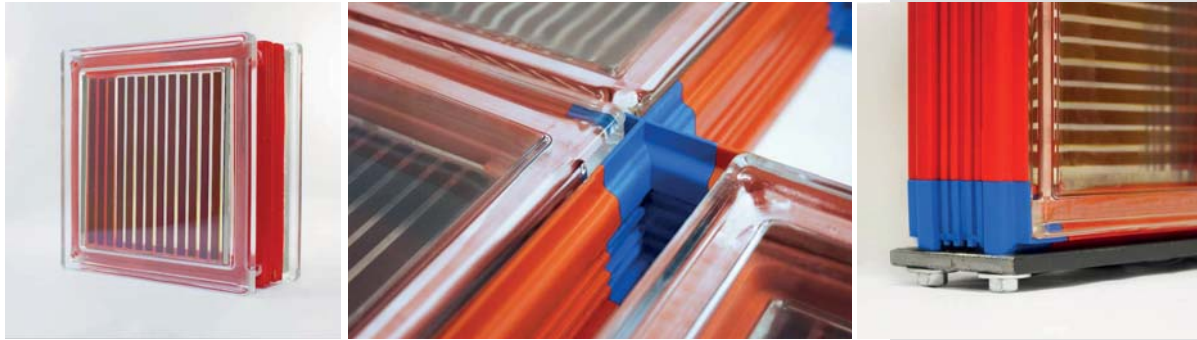


Figure 2. From left: the innovative glass block with DSCs and Thermal Belt; sub-components of the panel during their assembly; prototype of the precast and dry-assembled multifunctional panel made of innovative glass blocks integrated with DSCs.

De facto, the “crossings” have been provided with holes in both vertical and horizontal directions in order to enable steel bars to cross them according to different assembly needs. Their original dimensions have also been enlarged, going from a maximum width of 20x20 mm to one of 52x52 mm, in order to move the point of contact between a crossing and a profile away from the chamfered corners of the glass block and to guarantee, as a result, a higher air and water tightness to the panel (fig. 3).

These modifications, along with the other ones that are described later in the paper, can be also observed in the drawings at fig. 3 and in the prototypes pictures in fig. 5, which compare the initial design of profiles and crossings with the new “optimized” version.

tra loro e di realizzare giunti di spessore equivalente.

Allo scopo di garantire la massima standardizzazione dei pezzi i “profili” che costituiscono il pannello sono stati ottimizzati, dal punto di vista dimensionale, risultando ora tutti caratterizzati da una dimensione costante pari a 140 mm di lunghezza, contro i 170 mm originariamente previsti (fig. 3).

Gli elementi di incrocio fra profili verticali e orizzontali sono costituiti da “crocette” di 3 tipologie distinte in base della posizione assunta nel pannello: centrale, laterale o angolare. Anche queste “crocette” sono state, nel tempo, ottimizzate per ridurre la necessità di ricorrere a più stampi per la loro realizzazione; le stesse, infatti, sono state dotate di fori nelle due direzioni ortogonali tra loro per consentire il passaggio delle barre in accordo alle diverse esigenze

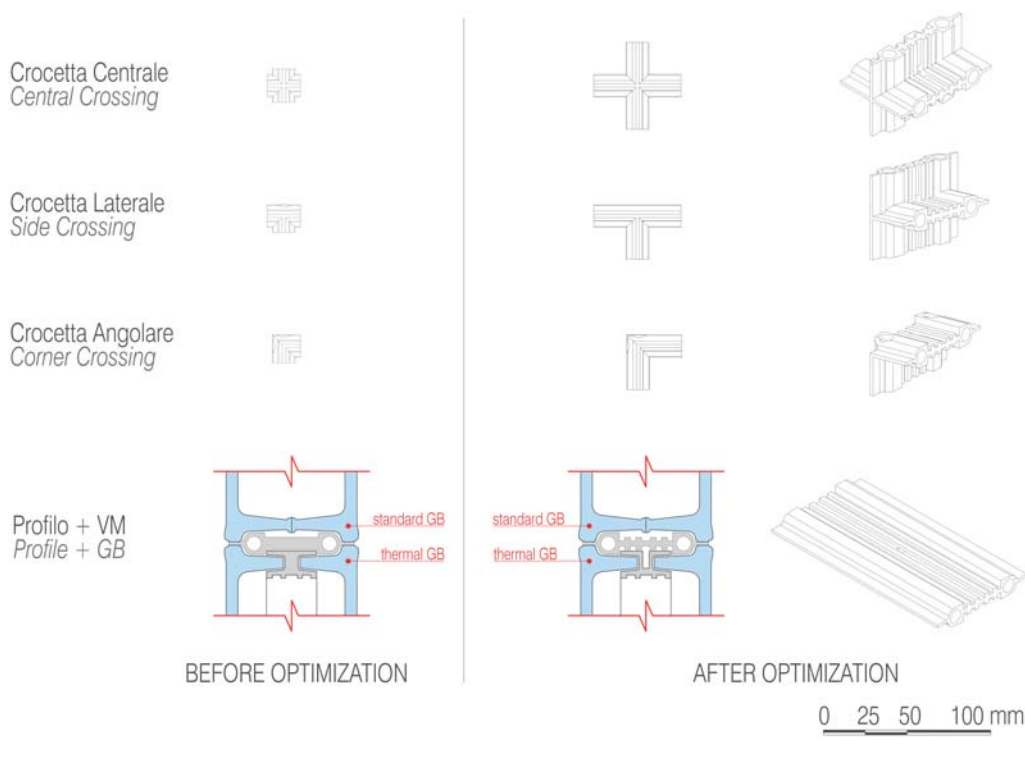


Figure 3. Indication of the plastic subcomponents of the panel and related operations of technology and performance optimization.

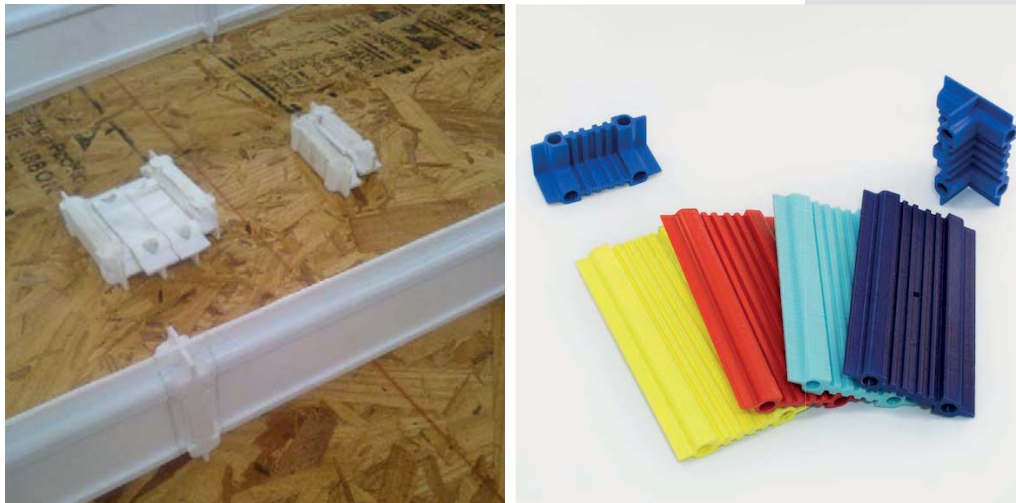


Figure 4. Prototypes of panel supporting elements (profiles and crossing): comparison between “initial” and “optimized” versions.

The technology and performance optimization of the sub-components of the glass block panel has also regarded, in particular, the so-called “thermal belt”, i.e. a plastic moulded element allowing for the “interruption” of the thermal bridge occurring between the glass shells composing the traditional glass block. In addition, the “thermal belt” holds the glass shells together thanks to a “cold” gluing, occurring by means of resins. In particular, the shape of the thermal belt has been modified compared to the original configuration in order to leave a central cavity useful to enhance further the effect of the thermal bridge interruption. This effect has also been verified by means of a combined multiphysic analysis by means of Comsol Multiphysics [5] (thermal, according to the EN 673:2011 [6], and mechanical, according to the UNI EN 12004 [7]) on numerical models of the glass block. The analysis has enabled to verify the feasibility of the hypotheses formulated for the design of the sub-components and has guided the choice of the most adapted plastic material. Indeed, at the beginning, it has been decided to use the same material for both profiles, crossings and thermal belt, by considering a polypropylene (PP) appropriately optimized and designed to fully respond to the expressed requirements in terms of conductivity, mechanical resistance and weather tightness. Furthermore, for the realization of the glass block integrated with the Dye-sensitized Solar Cells (considering, in a first phase, the fixing of the solar module to the inner face of the sun-exposed glass shell [4], appropriately optimized in the design for this purpose), the thermal belt has also been further modified in order to house appropriate lodgings for the electrical devices for the connection of the single modules (DSC-integrated glass blocks) into panels. Such connection’s devices are characterized by a shaped casing made of the same material as the thermal belt and have been designed in order to

di assemblaggio. Le dimensioni originarie delle crocette sono state, quindi, aumentate passando da un ingombro massimo di 20x20 mm (in sez. trasversale) ad una di 52x52 mm al fine di allontanare i punti di contatto delle stesse con i profili dagli angoli smussati dei vetromattoni, a garanzia di una maggiore tenuta all’acqua e all’aria del pannello (fig. 3). Queste modifiche, insieme alle altre descritte nel prosieguo dell’articolo, possono essere riscontrate oltre che nei disegni in fig. 3 anche nelle immagini dei prototipi in fig. 4, che evidenziano design iniziale di profili e crocette con quello “ottimizzato”.

Il processo di ottimizzazione tecnologico-prestazionale dei sub-componenti del pannello ha riguardato, anche la cosiddetta “cintura termica”, elemento in materiale plastico che permette di “interrompere” il ponte termico che esiste fra le due conchiglie che costituiscono il tradizionale vetromattone e che le tiene insieme tramite un incollaggio “a freddo” per mezzo di resine.

Il profilo della cintura è stato modificato, rispetto alla configurazione originaria allo scopo di lasciare una cavità centrale, in grado di potenziare ulteriormente l’effetto legato all’interruzione del ponte termico, valutato tramite l’analisi combinata –condotta utilizzando il software Comsol Multiphysics [5] e sulla base dei parametri imposti dalle norme EN 673 [6] (per l’analisi termica) e la UNI EN 12004 [7] (per l’analisi meccanica)– di modelli numerici del vetromattone che hanno permesso di verificare la fattibilità delle ipotesi di progetto del sub-componente e di guidare nella scelta del materiale più idoneo alla sua realizzazione. Si è, infatti, inizialmente ipotizzato di realizzare la cintura dello stesso materiale dei profili e delle crocette, utilizzando un polipropilene caricato ed appositamente progettato per rispondere appieno ai requisiti espressi in termini di conducibilità, resistenza meccanica e tenuta agli agenti atmosferici

Per la realizzazione, poi, del vetromattone integrato con moduli DSC (che, in prima istanza, prevede

simplify to the maximum extent the assembly process. Indeed, in the panel, the serial connection of modules occurs in vertical, by means of male-female system; a through hole is positioned exactly in the centre of the profile that is located between one row of glass blocks and the subsequent, allowing for the connection of the connectors coming out of each device and, at the same time, favouring the correct alignment of the involved elements.

In order to avoid condensation phenomena within the inner chamber of the glass block, besides the choice of the constituting material of the thermal belt, it has been crucial to avoid any element of discontinuity along its entire perimeter. For this reason, the electrical connection elements have been positioned along an appropriate groove running along its outer side, without interfering in any way with the inner side of the thermal belt itself nor with glass block cavity. The thin copper wires ( $\varnothing$  0.4 mm) linking the terminal connection elements to the solar modules polarities do not affect the tightness of the glass block cavity, resulting completely incorporated in the resin joint between the thermal belt and the glass shell. This solution has already been verified experimentally by immersing the assembled glass block prototypes in a water tank and observing, after the immersion, the eventual presence of water within the glass block cavity: a presence that resulted fully prevented (fig. 5).

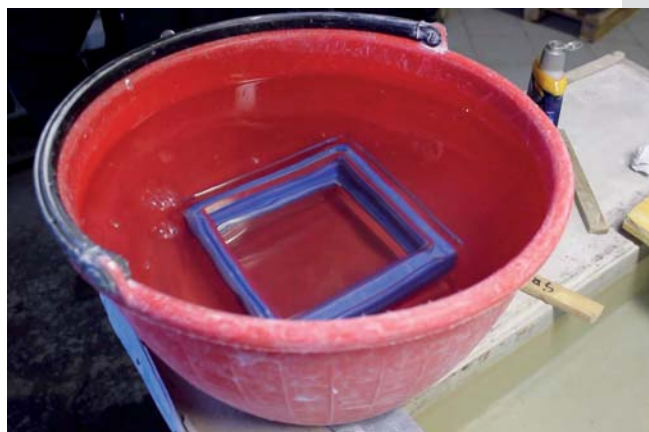


Figure 5. Prototype of glass block with polypropylene thermal belt during the immersion test for evaluating the water tightness.

### 3. SIMULATIONS AND CHOICE OF THE MATERIAL

The analytical simulations, executed by means of the software Comsol Multiphysics on three-dimensional models of the panel, evaluated in loading conditions defined according to the Italian regulation DM 14/01/2008, also known as NTC 2008 [8], allowed making a series of important considerations for the technological definition of the component. Indeed, it has been possible to evaluate the maximum tensions to which the elements constituting the

*l'incollaggio del modulo solare sulla faccia interna della conchiglia esposta al sole, adeguatamente modificata nel disegno, ma che può essere realizzato anche tramite l'uso della cintura termica, in accordo con le ipotesi brevettuali registrate [4]) la cintura è stata ulteriormente modificata in modo da prevedere degli opportuni alloggiamenti per l'inserimento dei connettori elettrici, necessari per il collegamento dei moduli fotovoltaici. I connettori sono caratterizzati da un elemento sagomato, realizzato con lo stesso materiale della cintura, e sono stati progettati nell'ottica della massima semplificazione del processo di assemblaggio. Nel pannello, infatti, la connessione in serie fra i moduli avviene in verticale, attraverso un connettore "maschio" e uno "femmina"; un foro passante in direzione trasversale, esattamente in corrispondenza del punto centrale dei profili posti fra una fila e l'altra di mattoni, permette la connessione dei connettori che fuoriescono dalla cintura favorendo, inoltre, il corretto allineamento dei sub-componenti. Per evitare fenomeni di condensa all'interno dell'intercapedine del mattone in vetro, oltre alla scelta del materiale costitutivo della cintura, è stato fondamentale evitare la presenza di elementi di discontinuità lungo il profilo della stessa. Per tale ragione, gli elementi di connessione elettrica sono stati posizionati lungo la "scanalatura" che corre sul lato esterno della cintura, senza interferire in alcun modo con l'interno della stessa e del vetromattone. I sottili fili in rame ( $\varnothing$  0.4 mm) che congiungono*

*gli elementi di connessione al modulo solare che si trova all'interno dell'intercapedine, non implicano alcuna conseguenza sulla tenuta dell'intercapedine, risultando completamente inglobati nel giunto di colla fra cintura e conchiglia. Questa soluzione è stata verificata sperimentalmente immergendo i prototipi assemblati in una vasca d'acqua ed osservando, dopo l'immersione, l'eventuale presenza di acqua all'interno della cavità del vetromattone stesso: presenza risultata totalmente scongiurata (fig. 5).*

supporting structure of the components are subjected that is a fundamental aspect for the choice of the plastic material to be used for the realization of profiles and crossings. The methodology used for the executions of such studies and that related to the ageing cycles of the samples has been illustrated in other works, which, however, considered the use of other plastic materials [9, 10].

In a first phase, indeed, Nylon PA6 reinforced with glass fibres was selected, due to its high values of tensile strength (86 MPa) and of Young's modulus (90.000 MPa); the peak in terms of Von Mises tensions measured in correspondence to the sub-components is 15.93 MPa and it was calculated by considering a horizontal force applied to the panel of 1339 N/m<sup>2</sup> and a prestressing force applied to the steel bars of 0.68 MPa; however, the high hygroscopicity of this plastic product led to have it excluded and consider other compounds.

The need to guarantee adequate mechanical performance, full water and air tightness of the joints, and good thermal insulation performance, all compatibly with the aspects related to the economic sustainability, led to opt for the material choice of a compound of Polypropylene plus mineral fibres allowing for the enhancement of the mechanical performance, fire resistance and durability of the PP, without compromising its thermal insulations, (as occurs, for example with the use of glass fibres). This compound is characterised by a water and air permeability equal to 0 as well as by mechanical resistance values able to guarantee the required performance.

However, in this regard, it should be highlighted that the choice of such material for the "thermal belt" has been carefully evaluated: indeed, although this material is characterized by good thermal conductivity ( $\lambda = 0.22$  W/mK) and optimal water and air tightness, the difficulty to glue it effectively and durably under all temperature, pressure and humidity conditions, required a thoughtful verification of the reliability of the gluing between the thermal belts and the glass shells. To this end, single lap-joint tests for the evaluation of the shear strength of the gluing between glass and plastic materials have been carried out by using samples of different materials (among which also the polypropylene) and different types of gluing products available on the market. In particular, the unsatisfying results achieved with the polypropylene [11], along with the operating difficulties encountered during the assembly of the glass shells with the thermal belt made of polypropylene (overdosing of the glue, very long setting time), persuaded to utilize another material for the sole realization of the thermal belt, in order to make it easier to be glued to glass. The selected material is polycarbonate that guarantees very good

### 3. LE SIMULAZIONI E LA SCELTA DEL MATERIALE

*Le simulazioni analitiche effettuate attraverso l'utilizzo del software per il calcolo agli elementi finiti Comsol Multiphysics su modelli tridimensionali del pannello valutati in condizioni di carico secondo il DM 14/01/2008 (NTC 2008) [8] hanno permesso di elaborare una serie di considerazioni importanti per la definizione tecnologica del componente. È stato possibile, infatti, valutare le tensioni massime a cui gli elementi costituenti la struttura di supporto del pannello sono soggetti, aspetto fondamentale per la scelta del materiale da utilizzare per la realizzazione dei profili e delle crocette. La metodologia impiegata per l'esecuzione di tali test, insieme a quella relativa ai cicli di invecchiamento dei provini, è stata illustrata in altri lavori che, tuttavia, valutavano l'impiego di altri materiali plastici [9, 10]. In una prima fase, infatti, la scelta è ricaduta sul Nylon PA6 rinforzato con fibre di vetro, caratterizzato da elevati valori di resistenza a trazione (86 MPa) e modulo elastico a trazione (90.000 MPa) contro il valore di picco tensionale di Von Mises generato in corrispondenza dei sub-componenti in plastica pari a 15.93 MPa calcolati da progetto considerando una forza orizzontale applicata pari a 1339 N/m<sup>2</sup>, ed un'azione di precompressione applicata alle barre di acciaio pari a 0.68 MPa. Tuttavia, l'elevata igroscopia di tale materiale plastico ha portato, successivamente, alla valutazione di altri polimeri. La necessità di garantire adeguate prestazioni meccaniche, totale impermeabilità all'acqua e all'aria, buone prestazioni in termini di isolamento termico, compatibilmente con una adeguata sostenibilità anche economica ha portato, infatti, a valutare un compound di polipropilene e fibre minerali in grado di garantire le prestazioni meccaniche, di resistenza al fuoco e di durabilità dei componenti, senza peggiorare quelle di isolamento termico (come, ad esempio, accade con l'aggiunta di fibre di vetro). Tale compound è caratterizzato da una permeabilità all'acqua e all'aria prossima allo 0 e da valori di resistenza a trazione sufficienti a garantire le prestazioni richieste dal progetto. A tal proposito, però, va detto che la scelta di tale materiale è stata valutata con molta attenzione: sebbene, infatti, lo stesso materiale garantisca buone prestazioni in termini di conducibilità termica ( $\lambda = 0.22$  W/mK) e ottime in termini di permeabilità all'acqua e all'aria, la difficoltà di incollarlo al vetro in maniera durevole ed efficace sotto tutte le condizioni di temperatura, pressione e umidità, ha richiesto una puntuale verifica dell'affidabilità dell'incollaggio della cintura termica con le conchiglie di vetro. Sono stati, quindi, effettuati test di resistenza a taglio dell'incollaggio single-lap joint utilizzando dei provini di differenti materiali plastici (fra cui, anche, il polipropilene) e diversi tipi di colle esistenti sul mercato. I risultati non soddisfacenti ottenuti con il polipropilene [11], in particolare, insieme alle difficoltà operative riscontrate nell'incollaggio*



mechanical performance and is characterised by a good thermal conductivity value, 0.12 W/mK – even better than that of polypropylene – but that, on the other hand, does not ensure the same, almost total, impermeability to air and water. The tightness of the thermal belt and the gluing boundary is a very important aspect for the durability of this component: the entry of humidity within the glass block might indeed compromise the component performance and cause condensation phenomena with the glass block cavity. If we consider that, we are dealing also with an electrical component, due to its integration with solar cells, these aspect turn out to be even more relevant. However, the use of polycarbonate, instead of polypropylene, has a very low incidence on the water and air tightness of the product, also because of the shape of the thermal belt and especially of the further presence of polypropylene profiles all around the thermal belt. These, besides functioning as separation elements between contiguous glass blocks, provide a sufficient protection from the humidity both for the thermal belt and for the glass block inner cavity.

The shape of the profiles has been modified in order to decrease the material consumption, to optimise the global weight of the components and to improve the manufacturing of the elements (i.e. avoiding inhomogeneous thicknesses in the shape of the items and the related problems such as differential mould shrinkage). In particular, at the beginning, these filled “entirely” the spaces between the glass blocks, having their shape complementing glass block side faces; their new design is instead characterized by a series of side indentations. Besides the already cited benefits, this operation has also the advantage to improve the thermal insulation performance of the supporting elements – and, because of the component – creating a series of small, insulating air chambers. This effect has been also verified on two- and three-dimensional models of the component by means of the software Comsol Multiphysics in the “Heat Transfer” mode and the results of these studies have already been illustrated in other works [12, 13]. The same software, used in the “Structural” mode, has also allowed verifying that the reduction of the dimensions of plastic supports and the modification of the constituent material do not affect negatively the performance of the dry-assembled component in relation to the safety requirements.

In order to analyse the behaviour of a panel installed in vertical position (as in the case of a façade) and subjected to an external load applied perpendicularly to its surface, simulations have been carried out considering a dry-assembled panel made of plastic (polypropylene) profiles and glass blocks integrated with thermal belt made of polycarbonate. The analysis – that for the sake of synthesis will not be described in this paper – allowed the authors to find the

*delle conchiglie di vetro alle cinture realizzate con lo stesso materiale (sovradossaggio della colla, eccessiva durata dei tempi di presa), hanno indotto alla sostituzione del materiale per la realizzazione della sola cintura al fine di renderla più facilmente incollabile alle conchiglie di vetro. La scelta è ricaduta, quindi, sul polycarbonato che garantisce delle ottime prestazioni di natura meccanica ed è caratterizzato da un buon valore di conducibilità termica di 0.12 W/mK – ancora migliore rispetto a quello del PP – ma che, di contro, non assicura la stessa quasi totale impermeabilità all'acqua e all'aria. La tenuta della cintura e dell'incollaggio della stessa alle conchiglie è un aspetto fondamentale per la durabilità del componente: l'ingresso di umidità all'interno del prodotto, infatti, potrebbe compromettere le prestazioni dello stesso e causare fenomeni di condensa nell'intercapedine che lo costituisce; trattandosi, inoltre, di un componente elettrico, a seguito della sua integrazione con le celle solari, questi aspetti divengono ancora di più delicata importanza. L'utilizzo del polycarbonato, in luogo del polipropilene, tuttavia, risulta avere una scarsissima incidenza sulle prestazioni di tenuta all'acqua e all'aria del prodotto, anche in considerazione della sagoma della cintura e della ulteriore presenza dei profili in polipropilene collocati intorno alla cintura stessa che, oltre a servire da elementi di separazione tra un vetromattone e l'altro – quando assemblati nel pannello – forniscono una sufficiente protezione dall'umidità sia alla cintura termica che alla sua intercapedine.*

*Per diminuire il consumo di materiale ed il peso complessivo dei sub-componenti del pannello, nonché per ottimizzare la produzione degli stessi evitando raffreddamenti disomogenei dei pezzi stampati e difficoltà nel controllo delle tolleranze, la sagoma dei profili è stata, successivamente, modificata. In una prima fase, infatti, questi sono stati disegnati a colmare interamente lo spazio fra un mattone e l'altro, derivandone la forma dal negativo delle facce laterali del vetromattone; il nuovo disegno prevede ora, invece, la presenza di una serie di “scanalature” che oltre ai benefici già citati, offrono anche il vantaggio di migliorarne le prestazioni connesse all'isolamento termico, creando una serie di piccole intercapedini isolanti. Tale beneficio è stato verificato sui modelli bidimensionali e tridimensionali del pannello utilizzando ancora una volta il software Comsol Multiphysics, in modalità “Heat Transfer” e i risultati di tali studi sono già stati illustrati dagli autori in altri lavori [12, 13]. Lo stesso software, utilizzato in modalità “Structural”, ha permesso inoltre di verificare che la riduzione delle dimensioni dei profili e la modifica del materiale costituente non pregiudicasse le prestazioni del pannello assemblato, garantendo le prestazioni di esercizio previste. A tal proposito, sono state effettuate delle simulazioni del comportamento del pannello assemblato con profili in polipropilene e vetromattoni con cintura in polycarbonato, sottoposto a flessione per effetto di azioni ad esso ortogonali e installato in posizione*

value in kg/m<sup>2</sup> of the maximum load to which the panel is able to withstand, in relation to its dimension (particularly, the height of panel, which represents the direction along which the stiffening steel bars are positioned). The results are showed in the table reported in fig. 6.

UNIFORMLY DISTRIBUTED LOAD [kg/m <sup>2</sup> ]	HEIGHT OF THE PANEL [cm]			
	100	200	300	400
200	●	●	●	●
220	●	●	●	●
260	●	●	●	-
370	●	●	●	-
400	●	●	-	-
600	●	●	-	-

Figure 6. The table shows the values related to the uniformly distributed load to which the panels can resist, according to four different dimensional configurations.

The maximum load to which the panel can be subjected, according to different dimensional configurations, goes from 250 kg/m<sup>2</sup> to 600 kg/m<sup>2</sup>; the conditions of installation (for example, the height to which the panel is installed, which has important relapses on the bending stresses on the panel due to wind and earthquakes, according to the Italian rules) will have to be evaluated in detail in relation to the characteristics of building (e.g. the distance between adjacent storeys of a building), the geographical area, etc., in order to choose the most proper configuration of the panel to answer to safety demands and to guarantee suitable values of mechanical resistance.

In the perspective of the maximum standardization of sub-components (and of the optimization of the deriving economic benefits, especially in the initial phases of development of such technological solution), each sub-component has been designed in order to allow for the assembly of the different product lines foreseen by SBskin. For example, the thermal belt presents different lodgings for the insertion of one or more sheets of transparent insulating materials (such as glass, low-e glass, polycarbonate, etc.) that allow for the attainment of different value of thermal transmittance based on the need of the users and on the regulatory requirements of the context where buildings belong. Moreover, the thermal belt itself can be used – without any modification – to assemble glass blocks that either are “photovoltaic” or not; in the first case, the appropriate lodging in the outer side of the thermal belt will be used for the insertion of the electrical connection element, whereas, in the second, it will remain empty.

The profiles and the crossings for the assembly of the glass blocks into panels have been optimized in order to be used for dry-assembling both 80 mm thick

verticale (come nel caso di una installazione di facciata). Le analisi – che per ragioni di sintesi non saranno descritte nel presente lavoro – hanno permesso di individuare il valore in kg/m<sup>2</sup> del carico massimo a cui tale pannello è in grado di resistere, in funzione della sua dimensione (ossia

dell'altezza del pannello, direzione lungo la quale vengono posizionate le barre di irrigidimento in acciaio). I risultati sono illustrati nella tabella in fig. 6.

Come si evince dalla tabella, il carico massimo a cui può essere sottoposto il pannello nelle diverse configurazioni dimensionali considerate va da 250 kg/m<sup>2</sup> a 600 kg/m<sup>2</sup>; le condizioni di installazione (ad esempio, la quota a cui il pannello è installato e che ha importanti ricadute sulle sollecitazioni flessionali dovute a vento e sisma, almeno in relazione a quanto imposto, in Italia, dalle NTC) andranno valutate nel dettaglio in relazione alle caratteristiche dell'edificio (ad esempio, l'altezza d'interpiano), il luogo geografico di riferimento, per poter scegliere la configurazione del pannello più adatta a rispondere alle esigenze connesse alla sicurezza, garantendo adeguati valori di resistenza meccanica.

Ai fini della massima standardizzazione dei sub-componenti (e dell'ottimizzazione dei benefici di natura economica ad essa connessi, soprattutto nelle fasi iniziali di sviluppo della soluzione tecnologica), ogni sub-componente è stato progettato in maniera da permettere l'assemblaggio delle differenti linee di prodotto previste dalla SBskin. Per esempio, la cintura presenta differenti alloggiamenti per l'inserimento di una o più lastre di materiale trasparente isolante (come vetro, polycarbonato, vetro basso-emissivo, ecc.), che permettono di ottenere differenti valori di trasmittanza termica per meglio rispondere alle esigenze dell'utenza ed ai requisiti normativi riferiti al contesto climatico cui l'edificio appartiene. Inoltre, la stessa cintura – senza alcuna modifica – può essere impiegata per assemblare mattoni “fotovoltaici” e non; nel primo caso, l'apposito alloggiamento verrà utilizzato per l'inserimento dell'elemento di connessione elettrica mentre, nel secondo, rimarrà vuoto. I profili e le crocette per l'assemblaggio del pannello, invece, sono stati

“standard” glass blocks, already on the market (that can be used when no specific requirements in terms of thermal insulation are required) and glass blocks “modified” with the thermal belt, however maintaining the same thickness (as shown in fig. 3). This is due, on the one hand, to the shape of the profiles, which adapt to that of the thermal belt and of the glass shells side faces and, on the other hand, to the choice of associating the thermal belt with “lowered” glass shells guaranteeing that, once glued to the thermal belt, an overall thickness of the product equal to the 80-mm standard currently commercialized is guaranteed. Furthermore, the profiles also present an adequately shaped hole ensuring – in case of multi-functional, precast and dry-assembled panels made of glass blocks integrated with DSCs – the serial electrical connection of adjacent glass blocks/solar modules of the same column.

#### 4. FINAL CONSIDERATIONS

The process of technological optimization and to the performance improvement of the here-illustrated building component required a continuous validation process of the hypotheses formulated along the way, not only as regards the technical-practical feasibility, but also as for the economic aspects. This has been possible, first of all, thanks to the use of software for the simulation of the performance of the product (both thermal, mechanical, energy-related, etc.), to the experimental verifications carried out through the testing of sub-components (either assembled or not) as well as through the contextual evaluation, for each element, the manufacturing costs both in relation to the prototyping stage and to the industrialization phase. In this sense, the utilization of tool for the manufacturing of prototypes such as a 3D printer and, later, of the steel mould for industrial pre-series, have allowed for a significant reduction of prototyping cost and thus for a remarkable acceleration of the decision-making process. Moreover, they also made it easier to evaluate other aspects deriving, for example, from the use of different colours for the plastic materials.

The assembly system indeed allows intervening, without any further productive complication, on the final appearance of the products. For example, through the combination of sub-components (thermal belt, profiles, crossings) of different colours or either through the change in the colour of the DSC modules – available on the market in different tones of red, green and orange, as well as in different transparency values – it has been possible to also evaluate the requirement linked with the appearance of the component

*ottimizzati per poter assemblare a secco sia vetromattoni “standard” di 80 mm di spessore, già presenti sul mercato (nel caso in cui non siano richieste specifiche prestazioni in termini di isolamento termico), sia vetromattoni “modificati” tramite l’inserimento della cintura termica in materiale plastico che, comunque, mantengono, lo stesso spessore (come evidenziato in fig. 3). Ciò è dovuto, da un lato, alla scelta della sagoma del profilo che si adatta alla forma della cintura restando aderente alle pareti laterali delle conchiglie e, dall’altro lato, alla scelta di associare alla cintura, conchiglie “ribassate” tali da garantire, una volta incollate, uno spessore equivalente allo spessore standard del vetromattonone attualmente commercializzato. I profili, inoltre, presentano un foro passante appositamente sagomato per assicurare – nel caso di pannelli multifunzionali e preassemblati a secco in vetromattoni integrati con moduli fotovoltaici – la connessione elettrica in serie fra i mattoni/moduli solari di una stessa colonna.*

#### 4. CONSIDERAZIONI FINALI

*Il processo di ottimizzazione tecnologico-prestazionale del componente edilizio qui illustrato ha richiesto un lavoro continuo di validazione delle diverse ipotesi formulate, sia dal punto di vista tecnico-realizzativo che da quello economico. Ciò è stato possibile, prima di tutto, grazie all’impiego di software per la simulazione delle prestazioni del prodotto (termiche, meccaniche, energetiche, ecc.) nonché grazie alle verifiche sperimentali condotte utilizzando prototipi di sub-componenti e di componenti assemblati e valutando, per ciascuno, i costi di realizzazione sia in relazione alla fase di prototipazione che di industrializzazione.*

*In tal senso l’impiego di strumenti per la realizzazione dei prototipi come la stampante 3D, prima, e gli stampi in acciaio per la produzione di una preserie industriale, poi, oltre ad una significativa riduzione dei costi di prototipazione – che hanno anche consentito di accelerare il processo decisionale –, hanno permesso di valutare altri aspetti derivati, ad esempio, dall’utilizzo di differenti gradazioni cromatiche dei materiali plastici utilizzati. Il sistema di assemblaggio a secco, infatti, consente di intervenire, senza alcuna complicazione di natura produttiva, sull’aspetto finale dei pannelli, per esempio attraverso la combinazione di sub-componenti di differenti colori che rendono ancora più versatile il prodotto brevettato. Attraverso la modifica del colore del materiale plastico da utilizzare per la realizzazione dei sub-componenti (cintura, crocette e profili) oppure, attraverso la modifica del colore dei moduli DSC – ad oggi disponibili in differenti colori, dal verde al rosso e all’arancione, nonché con diversi livelli di trasparenza – è stato possibile valutare, anche, i requisiti connessi all’aspetto del componente e, conseguentemente, le possibili ricadute formali sulla configurazione degli involucri edilizi traslucidi, sottolineando le interessanti potenzialità “estetiche” del prodotto brevettato. Il componente multifunzionale traslucido realizzato con vetromattoni integrati con moduli fotovoltaici di terza*

and, subsequently, to consider possible aesthetic relapses in the configurations of translucent building envelopes, highlighting the interesting potentialities of this patented product.

The multifunctional translucent component made of DSC-integrated glass blocks will be indeed able satisfy the needs of the most demanding clients, meeting the requirements of the BIPV market that is addressing towards the search for more and more effective products not only in terms of energy performance, but also as for the architectural appearance. This is also in line with the most recent regulatory orientations that, in many countries, are considering the supply of special economic incentives for those photovoltaic products that can be perfectly integrated, also from the technological point of view, with buildings without compromising their aesthetics (in case of retrofit) or guaranteeing a high aesthetic value (in case of new buildings).

## 5. REFERENCES

- [1] EPBD - Energy Performance of Buildings Directive. Direttiva 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), 2010.
- [2] Decreto Interministeriale, 26 giugno 2015 - Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.
- [3] <http://www.sbskin.it>.
- [4] Corrao R.; Morini M.; Pastore L., *A hybrid solar cell integrated glass block and prestressed panel made of dry-assembled glass blocks for the construction of translucent building envelopes*. PCT nr. WO 2013/132525 A2.
- [5] Comsol Multiphysics, versione 4.4. Comsol, 2013; Cfr. <http://www.comsol.com>.
- [6] EN 673:2011, "Glass in Building – Determination of Thermal Transmittance – Calculation Method", 2011.
- [7] UNI EN 12004, Adesivi per piastrelle: requisiti, valutazione di conformità, classificazione e designazione, 2007.
- [8] Decreto Ministeriale, 14 Gennaio 2008 - Norme tecniche per le costruzioni (NTC 2008).
- [9] Alaimo G.; Corrao, R.; Enea D.; Morini M, *SBskin Solar GB: durabilità di un vetromattone integrato con celle solari di terza generazione - SBskin Solar GB: the durability of 3rd generation solar cell integrated glass block*. In: Atti del Convegno Colloqui.AT.e 2016. MATER(I)A, Matera, 13-15 Ottobre 2016, a cura di A. Guida, A. Pagliuca. Roma: Gangemi editore s.p.a., p. 177-183.
- [10] Corrao R.; Garraffa A.; Giambanco G.; Trapani G., *Pannelli traslucidi preassemblati "a secco" e precompressi realizzati con vetromattoni "modificati"*, «Rivista della Stazione Sperimentale del Vetro», 41 (2011), n. 4, p. 6-19.
- [11] Inghilleri, S., *Verifica dell'affidabilità dell'incollaggio di un vetromattone integrato con cintura termica e cella DSC. Analisi sperimentale e prove di laboratorio*, Tesi di Laurea Magistrale, relatore prof.ssa R. Corrao, Università degli Studi di Palermo, A.A. 2015-16.
- [12] Morini M.; Corrao R.; Pastore L., *Analyses of Innovative Glass Blocks for BIPV: assessment of thermal and optical performance*, «International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development», 6 (2015), n. 2, p. 71-81.
- [13] Morini M.; Corrao R., *Energy optimization of BIPV glass blocks: a multi-software study*. In: Energy Procedia of the International Conference on Sustainability in Energy and Buildings SEB-16, 11-13 Settembre 2016, Torino, 111 (2017), p. 982-992.

generazione può assecondare, infatti, le richieste dei clienti più esigenti e del mercato BIPV alla ricerca di prodotti sempre più performanti non soltanto dal punto di vista energetico ma anche in relazione all'aspetto. Ciò è anche in linea con alcuni dei recenti indirizzi normativi che, in vari paesi, prevedono la concessione di speciali incentivi di natura economica per quei prodotti fotovoltaici multifunzionali in grado di integrarsi perfettamente dal punto di vista tecnologico negli edifici senza, inoltre, comprometterne l'estetica originaria (laddove si tratti di interventi di retrofit) o garantendo un alto valore estetico, nel caso di nuove realizzazioni.