

Marianna Rotilio,

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile-Architettura e Ambientale, Università degli Studi di L'Aquila, Italia

marianna.rotilio@univaq.it

Abstract. Nel settore delle costruzioni si sta verificando la penetrazione dei nuovi paradigmi dell'Industria 4.0 e dell'economia circolare al fine di rispondere ad istanze di efficienza energetica, ottimizzazione nell'impiego delle risorse, automazione e monitoraggio delle attività produttive. Pertanto nel presente articolo si intende illustrare una attività di ricerca industriale e sviluppo sperimentale che ha condotto alla creazione di un innovativo prodotto denominato MULTIFid. Esso è costituito da un pannello intelligente, economico ed a basse emissioni, realizzato con gli scarti della lavorazione industriale di carta e cartone che intende contribuire allo sviluppo della tecnologia abilitante fondamentale dei "Materiali avanzati" per le Fabbriche Intelligenti.

Parole chiave: Innovazione di prodotto; Industria 4.0; Materie prime secondarie; Cartone ondulato; Rfid.

Introduzione

Nell'industria delle costruzioni si sta assistendo da anni ad un crescente orientamento verso processi più sostenibili, con un focus particolare sulle risorse e i materiali con impatti ambientali inferiori sull'intero ciclo di vita. L'orientamento normativo europeo va a sostegno della promozione del mercato delle materie prime secondarie, in linea con quanto sostenuto nel Piano d'azione dell'Unione Europea per l'economia circolare COM(2015) 614 final 02.12.2015 e nell'osservanza del 7th Environment Action Programme. Esistono degli studi sperimentali in tal senso, ad esempio Gounni *et al.* (2019) e Bourguiba *et al.* (2020) indagano rispettivamente le prestazioni termiche di isolante termico per l'edilizia derivante dai rifiuti tessili e da scarti di piume d'oca, Milovanovic *et al.* (2012) studiano le prestazioni di un pannello in calcestruzzo con integrata lana minerale prodotta con vetro e silice di riciclo. Nel contesto specifico dei materiali prodotti da scarti vegetali Zhou *et al.* (2010), Binici *et al.* (2020), Cascone *et al.* (2019; 2020), Pásztor *et al.* (2020), Viel *et al.* (2019) studiano nuove soluzioni di isolamento termico per l'edilizia costituite ri-

spettivamente da fibra di cotone senza leganti, gambi di girasole e di grano con additivi, rifiuti alimentari, scarti agricoli, corteccia vegetale, residui di canapa e pannocchia di mais. Purtroppo però nella maggior parte dei casi queste sperimentazioni non trovano applicazione all'interno della filiera dei materiali da costruzione per molteplici motivazioni. Per il contesto italiano ad esempio, la stessa Commissione Europea ha individuato nella mancanza delle opportune procedure di certificazione uno dei principali ostacoli alla loro diffusione.

Riflessioni diverse si possono elaborare invece in merito ai nuovi paradigmi dell'Industria 4.0 e dell'*Internet of Things*, infatti lo studio dello stato dell'arte ha evidenziato la presenza di nuovi ambiti di ricerca ma anche di numerose applicazioni. I principali campi di utilizzo delle nuove tecnologie in edilizia sono quelli della manutenzione predittiva, verifiche prestazionali, monitoraggio dei materiali da costruzione, soluzioni per l'efficienza energetica, ottimizzazione della sicurezza sul lavoro. Wenig *et al.* (2008) impiegano sistemi di monitoraggio wireless in un ponte strallato, Valero *et al.* (2015) analizzano i principali campi di diffusione dei sensori Rfid nel mondo delle costruzioni, identificando l'ambito del tracciamento di mezzi e risorse, la combinazione con altre tecnologie ed il tema della sicurezza dei lavoratori. Nel campo specifico del monitoraggio dei materiali messi in opera, Stojanović *et al.* (2010), Strangfeld e Klawe (2021), Strangfeld *et al.* (2019) e Rotilio *et al.* (2018) impiegano sensori per monitorare rispettivamente il contenuto di acqua in mattoni in argilla e per blocchi di calcestruzzo, l'umidità di massetti e materiali isolanti, del cemento armato, delle costruzioni in legno Xlam. Infine, un forte incremento nell'impiego di sistemi intelligenti si sta verificando nell'ambito nella sicurezza sui luoghi di

Product innovation between circular economy and Industry 4.0

Abstract. In the construction sector, the new Industry 4.0 and circular economy paradigms are currently playing an increasingly important role in order to respond to demands for energetic efficiency, optimisation of resource usage, automation and production activities monitoring. Therefore, this article aims to illustrate industrial research and an experimental development activity that led to the creation of an innovative product named MULTIFid. It consists of an intelligent, economical and low-emission panel, made with waste from the paper and cardboard industrial manufacturing process which intends to contribute to the development of the fundamental enabling technology of "Advanced Materials" for Intelligent Factories.

Keywords: Product innovation; Industry 4.0; Secondary raw materials; Corrugated cardboard; Rfid.

Introduction

For years in the construction industry, there has been a growing orientation towards more sustainable processes, with a particular focus on resources and materials with lower environmental impacts over the entire life cycle. The European regulatory orientation supports the promotion of the secondary raw materials market, in harmony with what is claimed in the European Union Action Plan for the circular economy COM (2015) 614 final 02.12.2015 and in compliance with the 7th Environment Action Programme. There are experimental studies in this respect. For instance, Gounni *et al.* (2019) and Bourguiba *et al.* (2020) respectively investigate the thermal performance of thermal insulation for buildings generated from textile waste and goose down scraps; Milovanovic *et al.* (2012) studied the performance of a

concrete panel with integrated mineral wool produced with recycled glass and silica. In the specific context of materials produced from vegetable waste, Zhou *et al.* (2010), Binici *et al.* (2020), Cascone *et al.* (2019, 2020), Pásztor *et al.* (2020) and Viel *et al.* (2019) study new thermal insulation solutions for buildings which respectively consist of cotton fibre without binders, sunflower and wheat stalks with additives, food waste, agricultural waste, vegetable bark, hemp residues and corncob. Unfortunately, however, in the majority of cases, these experiments cannot be applied within the building materials supply chain, for multiple reasons. In the Italian context, for example, the European Commission itself has identified the lack of appropriate certification procedures as one of the main obstacles to their spread. On the other hand, different consid-

lavoro, mediante il diffondersi di wearable technologies (Wu *et al.*, 2019), piattaforme automatizzate di gestione della sicurezza (Ding *et al.*, 2013), monitoraggio di presenza nonché delle attività svolte in condizioni di rischio.

Alla luce di quanto argomentato, nel presente articolo si intende illustrare parte di una attività di ricerca industriale e sviluppo sperimentale, svolta in sinergia tra due aziende ed università, che ingloba in sé i nuovi paradigmi dell'Industria 4.0 e dell'economia circolare, per la promozione della sicurezza sul lavoro nelle fabbriche. Tale attività è finalizzata alla creazione di una innovazione di prodotto che si concretizza in "MULTIFid - Pannelli multifunzionali per le nuove fabbriche intelligenti".

MULTIFid

Obiettivi e metodologia

Il progetto MULTIFid ha come obiettivo principale quello di creare un prodotto innovativo costituito da un pannello intelligente, economico ed a basse emissioni, realizzato con gli scarti della lavorazione industriale di carta e cartone (Rotilio and De Berardinis, 2020).

All'interno del pannello è integrato un sistema di comunicazione passivo che impiega tecnologia Rfid per il soddisfacimento di differenti esigenze. In particolare le principali funzioni che esso è chiamato a svolgere consistono nel monitoraggio della posizione dei lavoratori al fine di garantire la sicurezza nelle aree di rischio, il miglioramento termico dell'involucro edilizio nel quale il pannello sarà installato ed il monitoraggio delle condizioni di umidità del pannello stesso. Le prime due innovative funzioni rispondono ad esigenze specifiche nell'ambito del programma "Fabbrica intelligente" di cui all'area tematica nazionale di riferimento dell'"Industria intelligente e sostenibile, energia

erations may be elaborated on the new Industry 4.0 and Internet of Things paradigms; in fact, the study of the state of the art has highlighted the existence of new research areas and several available applications. The main application fields of new technologies in construction are those related to predictive maintenance, performance checks, the monitoring of building materials, solutions for energy efficiency and workplace safety optimisation. Wenig *et al.* (2008) employ wireless monitoring systems on a cable-stayed bridge, Valero *et al.* (2015) analyse the main diffusion fields of RFID sensors in the construction world, identifying the scope of tracking means and resources, the combination with other technologies and the issue of worker safety. In the particular context of monitoring the materials used, Stojanović *et al.* (2010), Strangfeld and

Klawe (2021), Strangfeld *et al.* (2019) and Rotilio *et al.* (2018) employ sensors to supervise the water content in clay bricks and concrete blocks, the humidity of screeds, insulating materials, reinforced concrete and cross laminated timber constructions respectively.

Finally, a sharp increase in the use of intelligent systems is taking place in the field of workplace safety, through the spread of wearable technologies (Wu *et al.*, 2019), automated safety management platforms (Ding *et al.*, 2013), the monitoring of presence and activities performed in risky conditions.

In view of what has been argued, this paper aims to illustrate part of an industrial research project and experimental development activity, carried out in synergy between two companies and a university, which incorporates

ed ambiente". Nello specifico MULTIFid intende contribuire allo sviluppo della tecnologia abilitante fondamentale dei "Materiali avanzati". Infine la terza funzione consente di superare la principale criticità del materiale costituente il pannello, mediante un monitoraggio continuo.

Il progetto prevede la realizzazione di due tipologie di pannello "A" e "B". Il primo tipo impiega la polpa di carta opportunamente trattata al fine di renderla compatibile con la stampa 3D; il secondo invece utilizza singoli layers di cartone ondulato disposti secondo più strati. L'analisi dello stato dell'arte ha evidenziato come in edilizia siano già presenti prodotti a base di carta e cartone, ad esempio in ambito strutturale per la realizzazione di casseforme, negli impasti di conglomerato cementizio per finalità di alleggerimento; per la realizzazione di parti d'opera; per l'isolamento acustico e per quello termico. In questo ultimo campo di interesse per gli obiettivi di MULTIFid, i prodotti diffusi in commercio si dividono in due ambiti principali: quello dei materiali "sfusi", impiegati come riempimento, e quello dei materassini o pannelli a base di fiocchi di cellulosa miscelati con fibre di sostegno. Esistono inoltre studi sperimentali, oltreché brevetti, inerenti l'impiego di pannelli e componenti in carta e cartone in edilizia, Asdrubali *et al.* (2016), Distefano *et al.* (2018), ma, di fatto, nessun prodotto è in grado di svolgere le funzioni definite nel progetto di ricerca oggetto del presente articolo. Per quanto argomentato appare evidente come MULTIFid sia un prodotto fortemente innovativo dato dalla integrazione tra l'architettura di sostegno al sistema sensoriale, ovvero il pannello, ed il sistema sensoriale stesso. L'approccio metodologico (Fig. 1) consta di quattro fasi principali inerenti lo studio dello stato dell'arte finalizzato alla definizione delle specifiche di progetto; lo svilup-

the new Industry 4.0 and circular economy paradigms, in order to promote workplace safety in factories. The aim of this activity is to create a product innovation that takes the form of "MULTIFid - Multifunctional panels for new intelligent factories".

MULTIFid

Purpose and methodology

The main goal of the MULTIFid project is to create an innovative product that consists of an intelligent, economical and low-emission panel, made with waste from paper and cardboard industrial manufacturing (Rotilio and De Berardinis, 2020).

A passive communication system is integrated inside the panel which uses RFID technology to satisfy different needs. In particular, the main functions that it is expected to perform are the monitoring of the position of

workers in order to ensure safety in risk areas, the thermal improvement of the building envelope in which the panel will be installed and the monitoring of the humidity conditions of the panel. The first two innovative functions fulfil specific needs within the "Smart Factory" programme that is cited in the national reference area of "Smart and sustainable industry, energy and environment". In detail, MULTIFid intends to contribute to the development of the fundamental enabling technology of "Advanced Materials". In the end, the third function allows the main criticality of the material which forms the panel to be overcome through constant monitoring. The project provides for the construction of two typologies of panels, respectively named "A" and "B". The first typology uses paper pulp properly treated in order to make it suitable for

po dei due sistemi, costruttivo e sensoriale; l'integrazione tra i due mediante l'esecuzione di test e verifiche; la progettazione e realizzazione di box prototipale del "Sistema MULTIFid". Poiché il progetto si fonda su processi di natura principalmente sperimentale, è evidente come l'approccio metodologico sia basato su una procedura di tipo iterativa con implementazione e miglioramento continuo dei risultati.

Ad oggi il processo metodologico descritto è stato completamente sviluppato per il pannello di tipo "B", oggetto del presente articolo, mentre è in corso di svolgimento per il pannello di tipo "A", qui non argomentato.

Progettazione e prototipazione del Sistema Pannello

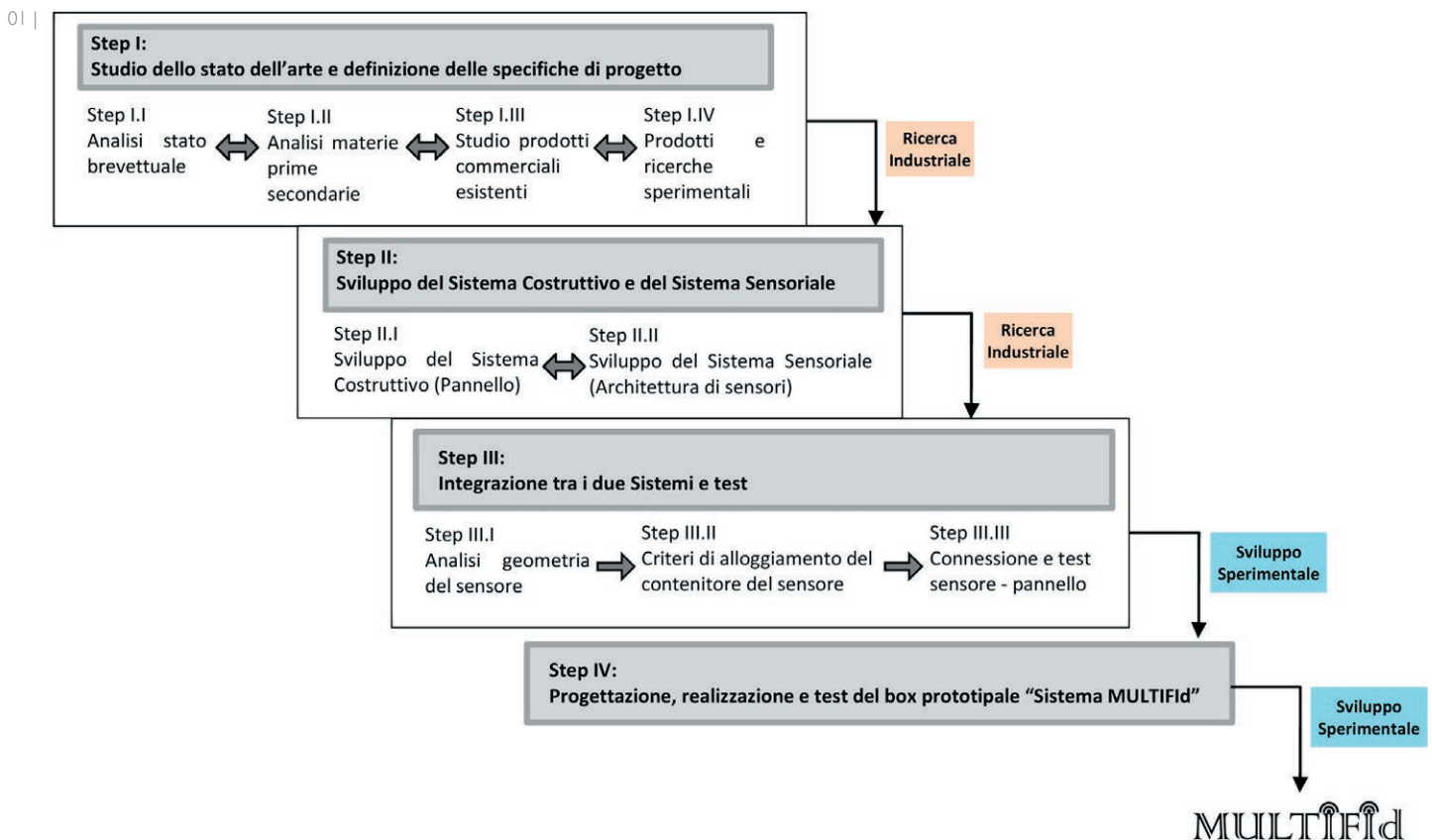
I punti cardine sui quali si è basato il progetto sono stati i seguenti:

- accoppiabilità dei singoli *layer* di cartone ondulato di riciclo derivanti dall'attività industriale del co-proponente;
- creazione di un sistema modulare che soddisfi necessità di versatilità d'uso, adattabilità e reversibilità;
- velocità di produzione ed industrializzazione;
- facilità di trasporto e di montaggio;

- soddisfacimento prestazioni termo-igrometriche del pannello da utilizzarsi come strato isolante;
- integrabilità del sistema sensoriale.

Il *concept* attorno a cui ruota l'idea, prevede che i pannelli siano caratterizzati dall'assemblaggio mediante incollaggio di fogli di cartone ondulato. La forza del sistema è nella sua semplicità poiché aggiungendo o sottraendo *layer* sarà possibile aumentare o diminuire lo spessore dei pannelli adattandoli alle esigenze della Fabbrica Intelligente. I *layer* sono stati disposti secondo tre differenti orientamenti, parallelo, ortogonale 1x1 e ortogonale 2x2. Al suo interno il pannello ingloba delle asole per l'alloggiamento dell'architettura sensoriale. In merito alla finitura, è stato previsto che il pannello abbia un trattamento di protezione incendio mediante vernici già presenti in commercio, nonché strato di completamento realizzato mediante stampa sul cartone. Tale finitura è stata preferita ad altre tipologie compatibili poiché, a seguito di prove, è risultata quella che meno inficia il segnale del sistema sensoriale.

Le principali tipologie di cartone di riciclo a disposizione del co-proponente impiegate per lo sviluppo del Sistema Pannello sono state le seguenti:



Tab 01 | Riepilogo dei principali dati tecnici dei sei prototipi progettati (elaborazione grafica di M. Rotilio)
Summary of the main technical features of the six prototypes designed (M. Rotilio elaboration)

Tipo	Materia prima	Tipologia di cartone	Tipo di sezione	Onda	Peso (Kg)
b)1	Cartone ondulato di riciclo	KSKSK/54545/BC	Layer ortogonali 2x2	BC	12,30
b)2		KSKSK/54545/BC	Layer paralleli	BC	12,30
b)3		KSKSK/54545/BC	Layer ortogonali 1x1	BC	12,30
b)4		PBMMMTB/66263/EE	Layer paralleli	EE	25,05
b)5		PBMMMTB/66263/EE	Layer ortogonali 1x1	EE	25,05
b)6		PBMMMTB/66263/EE	Layer ortogonali 2x2	EE	25,05

Tab. 01

- KSKSK/54545/BC;
- PBMMMTB/66263/EE.

A partire da tale materiale sono stati progettate sei differenti tipologie di prototipo di pannello (Tab. 1; Fig. 2).

Dal punto di vista dell'integrazione dei sensori Rfid, all'interno del sistema modulare ideato è stata progettata una asola tenendo presenti tre elementi principali:

- la geometria dei sensori;
- il posizionamento dell'alloggiamento di contenimento del sensore nello spessore nel pannello;
- l'integrazione e la connessione tra il sensore ed il pannello.

In merito al primo punto sono state progettate tre tipi di asole differenti poiché i sensori da impiegare hanno tre diverse geometrie. In relazione al posizionamento dell'alloggiamento di contenimento del sensore nello spessore nel pannello, sono state effettuate differenti prove al fine di capire quale fosse la posizione che, fra quelle ipotizzate, inficciasse meno la comunicazione tra gli elementi del sistema sensoriale. Poiché in grado di assicurare la migliore trasmissione del segnale, l'asola è stata posizionata verso il lato del pannello a contatto con l'ambiente interno della Fabbrica Intelligente ed in particolare nel centro di tale pannello. L'asola è stata concepita in modo tale da essere posizionata immediatamente prima dell'ultimo *layer* di cartone ondulato, al fine di essere completamente nascosta, non inficiare la successiva finitura superficiale del pannello e proteggere il sensore da ogni manomissione o estrazione da parte di personale non autorizzato.

In relazione al fissaggio *sensor-layer*, è stata prevista una connessione a secco per mezzo di viti. Tale sistema risulta consoli-

dato dall'analisi dei prodotti commerciali in cartone oltre al fatto che le tre tipologie di sensori risultano già dotate di asole per alloggiare viti.

Il processo di integrazione contempla tre fasi descritte in figura 3. Preliminarmente verranno incollati i singoli *layer*, a meno dell'ultimo, e predisposta l'asola secondo le indicazioni progettuali. In seguito verrà alloggiata e fissata una delle tre tipologie di sensori, infine verrà incollato l'ultimo *layer* (Fig. 3).

Il sistema di integrazione progettato e descritto è tale che, in caso di necessaria sostituzione/controllo del sensore, si andrebbe eventualmente a sacrificare solamente l'ultimo *layer* del pannello, recuperando il sensore senza difficoltà. Ciò a differenza di alcuni sistemi già brevettati che contemplano un fissaggio del sensore per mezzo di colle che, in caso di rimozione, causerebbero il danneggiamento e/o la perdita dell'intero pannello.

La fase progettuale illustrata è stata svolta tenendo conto dei macchinari già in dotazione del co-proponente, al fine di garantire la produzione industriale del prodotto, la cui destinazione finale sarà quella della commercializzazione. La velocità di produzione conseguita risulta pari a circa dieci minuti per il pannello con cartone onda BC e quindici minuti per onda EE. Tali tempi sono comprensivi della realizzazione dell'asola e dell'alloggiamento dell'Rfid.

Sui prototipi realizzati sono state svolte differenti tipologie di test e prove di laboratorio per verificare il conseguimento degli obiettivi di MULTIFid. Nello specifico, per verificare la conduttività termica dei pannelli, oltre al calcolo ai sensi della UNI ISO 6946:2008, sono state svolte analisi mediante *Guarded Hot Box*,

3D printing; on the other hand, the second one uses single layers of corrugated cardboard arranged in several layers. The analysis of the state of the art has highlighted that in construction there are already products based on paper and cardboard. For instance, they are used in the structural field for the construction of formwork, in the mix of concrete for lightening purposes, for the construction of parts in some building elements and for acoustic and thermal insulation. In this last field of interest for the MULTIFid goals, the products available on the market are divided into two main areas: one of "loose" materials used as filling, and one of mats or panels based on cellulose flakes mixed with supporting fibres. There are also experimental studies, as well as a patent, concerning the use of paper and cardboard panels and components in

construction, Asdrubali *et al.* (2016), Distefano *et al.* (2018), but, factually, no product is able to perform the functions defined in the research project dealt with in this paper. According to what is argued, it is clear that MULTIFid is a highly innovative product due to the integration between the sensory system and its supporting architecture, i.e. the panel. The methodological approach (Fig. 1) consists of four main phases: the study of the state of the art aimed at defining the project specifications; the development of the two systems, constructive and sensory; their integration, thanks to tests and verifications; the design and construction of a prototype box of the "MULTIFid System". Since the project is based on processes with a mainly experimental nature, it is obvious that the methodological approach is based on an iterative procedure with

implementation and continuous improvement of results.

Nowadays, the methodological process described has been fully developed for the type "B" panel which is the object of this paper, while it is in progress for the type "A" panel which is not discussed here.

Design and prototyping of the panel system

The key points on which the project was based were the following:

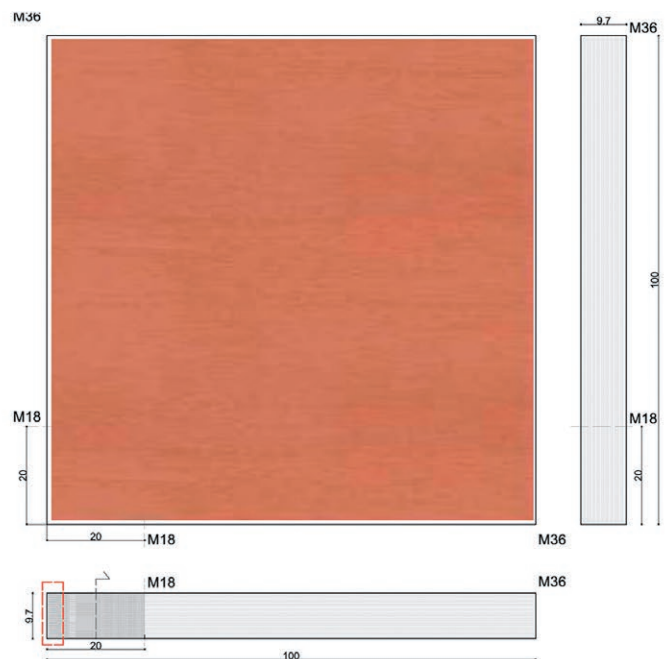
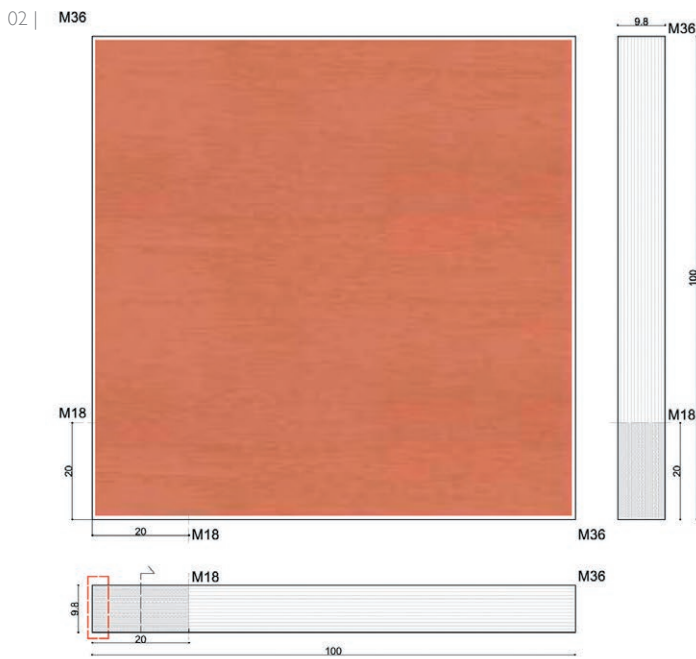
- junction of the different layers of recycled corrugated cardboard derived from the industrial activity of the co-proposer;
- creation of a modular system that satisfies the need for versatility of use, adaptability and reversibility;
- quickness of production and industrialisation;
- ease of transport and assembly;

- fulfilment of the thermo-hygrometric performance of the panel to be used as an insulating layer;

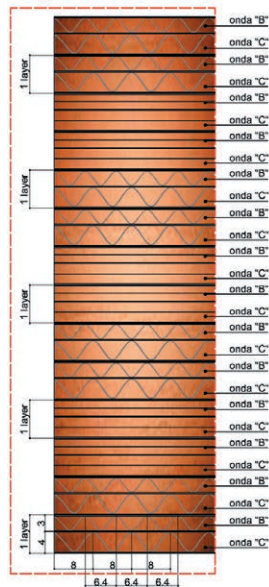
- integrability of the sensory system. The concept around which the idea revolves is that the panels are characterised by the assembly of gluing sheets of corrugated cardboard. The highlight of the system is in its simplicity because thanks to the addition or subtraction of layers, it will be possible to increase or decrease the thickness of the panels, adapting them to the needs of the Intelligent Factory. The layers were placed according to three different orientations: parallel, orthogonal 1x1 and orthogonal 2x2. The panel incorporates internal slots to ease the sensorial architecture. As regards the finishing, it was expected that the panel has a fire protection treatment through paints already on the market and a completion layer created with printing on

progettata ad hoc dai consulenti, oltreché prove termoflussimetriche. I risultati conseguiti sono tali che i valori di conducibilità dei pannelli di tipo "B" oscillano, a seconda del tipo (Tab. 1), tra 0,044 W/mK e 0,064 W/mK pertanto, non solo soddisfano i K_{pi} di progetto, ma risultano in linea con i valori di lambda di altri prodotti edili destinati all'isolamento termico. Pertanto il sistema pannello progettato può essere impiegato al fine di conseguire il miglioramento termico dell'involucro delle fabbriche (Fig. 4).

Contemporaneamente alle attività descritte, necessarie per la definizione del cosiddetto sistema costruttivo, sono state condotte quelle per la definizione del sistema sensoriale. L'architettura di MULTIFI è stata pensata con l'obiettivo di implementare la sicurezza nelle fabbriche mediante il controllo dell'ingresso dei lavoratori nelle aree di rischio e dell'interazione uomo-macchina e uomo-robot. Il posizionamento del pannello sulle pareti della fabbrica consente la suddivisione del volume interno in porzio-



Dettaglio costruttivo

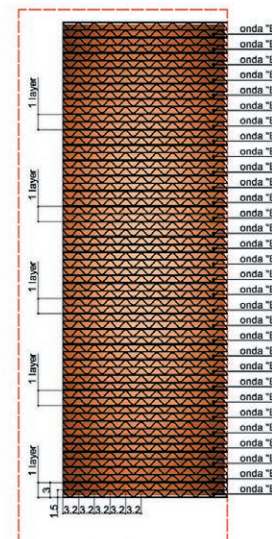


Descrizione tecnica

Pannello di tipo b)	
Prototipo	n. 1
Materia prima	Cartone ondulato di riciclo
Lunghezza	100 cm
Larghezza	100 cm
Spessore	9,8 cm
Tipo di sezione	Layer ortogonali 2X2
Tipologia di cartone	KSKSK/54545/BC
Copertina esterna	carta Kraft 200g/mq
Semichimica	127 g/mq in onda B
Foglio teso	carta Kraft 200g/mq
Semichimica	127 g/mq in onda C
Copertina interna	carta Kraft 200g/mq
Altezza onda "B"	3 mm
Passo onda "B"	6,4 mm
Numero di onde	155 in un metro
Altezza onda "C"	4 mm
Passo onda "C"	8 mm
Numero di onde "C"	125 in un metro
Altezza layer	7 mm (onda B+C)
Peso pannello	12,3 kg
n. Layer	14
Peso layer	0,88 kg



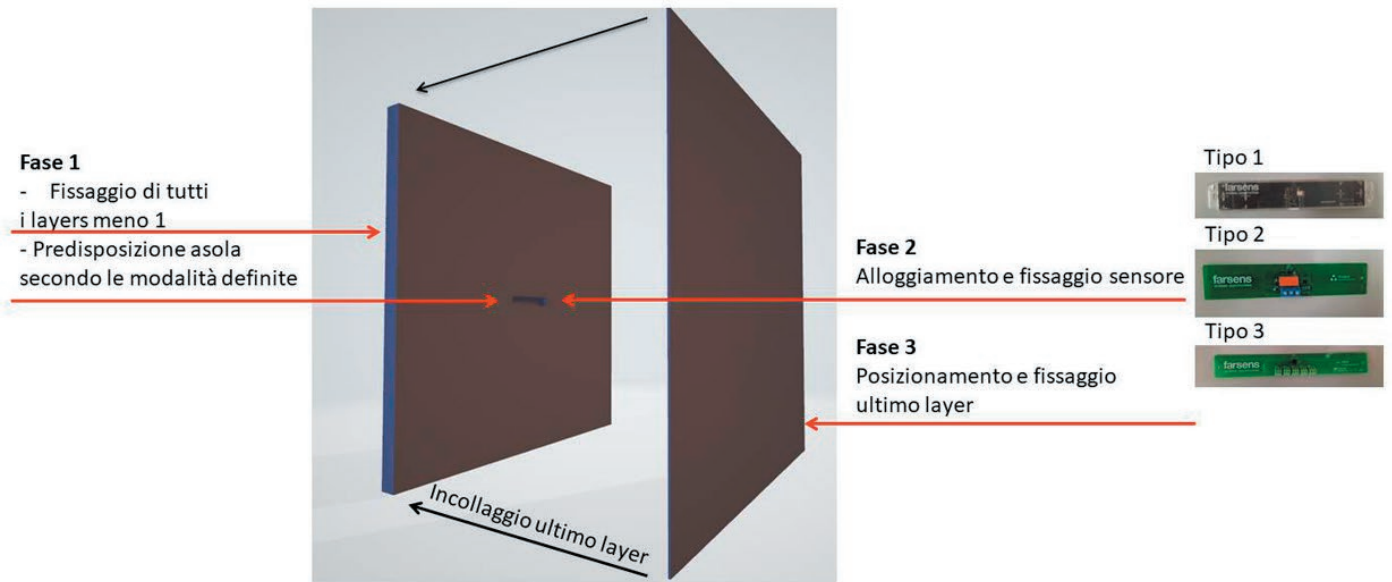
Dettaglio costruttivo



Descrizione tecnica

Pannello di tipo b)	
Prototipo	n. 4
Materia prima	Cartone ondulato di riciclo
Lunghezza	100 cm
Larghezza	100 cm
Spessore	9,7 cm
Tipo di sezione	Layer paralleli
Tipologia di cartone	PBMMMTB/66263/EE
Patinato bianco	190 g/mq
M	150 g/mq in onda E
M	112 g/mq
M	150 g/mq in onda E
TB	125 g/mq
Altezza onda "E"	1,5 mm
Passo onda "E"	3,2 mm
Numero di onde	312 in un metro
Altezza layer	3 mm (onda E+E)
Peso pannello	25,05 kg
n. Layer	31
Peso layer	0,81 kg





ni univocamente identificabili mediante coordinate cartesiane. In tal modo la posizione di ogni risorsa presente all'interno del volume, se dotata di *smart tag*, potrà essere sempre nota. Questo sistema può mitigare il rischio in numerosissime condizioni di pericolo, come ad esempio nel caso di lavoratore isolato, nell'ipotesi di dover effettuare un recupero di uomo a terra, oppure nell'eventualità che un operatore non autorizzato entri nell'area di rischio di una macchina/robot. Il tutto gestito anche da remoto, mediante *alert*, *warning* e comunicazioni dirette ai soccorritori e al RSPP, Responsabile del Servizio Prevenzione e Protezione, aziendale. Il sistema progettato si compone di *tag* con *chip* ed antenna; ulteriore antenna che colloquia con quella del *tag* attraverso le onde radio; *reader* che da una parte scambia dati con

i *tags* Rfid e dall'altra s'interfaccia a un sistema informatico cui è collegato; *middleware* di interfaccia. Infine il pannello è equipaggiato con sensori di umidità per il monitoraggio continuo. In analogia al sistema costruttivo, anche quello sensoriale è stato oggetto di numerosi test e prove di laboratorio per verificare la corretta trasmissione dei segnali e l'effettivo funzionamento. L'ultima attività prevista consiste nella progettazione esecutiva del sistema di fissaggio dei pannelli e nella progettazione e realizzazione del box "Sistema MULTIFID" (Fig. 5). Tale box riproduce in versione prototipale l'interno di una Fabbrica Intelligente e consentirà di calibrare il sistema mediante test e verifiche individuando eventuali problematiche a posteriori e possibili soluzioni di perfezionamento ed ottimizzazione.

the cardboard. This finishing was preferred to other compatible typologies because, after some tests, it was found to be the one that least affected the signal of the sensory system.

The main typologies of recycled cardboard at the disposal of the co-proposer used for the development of the Panel System were the following:

- KSKSK/54545/BC;
- PBMMMTB/66263/EE.

Starting from this material, six different types of panel prototypes were designed (Tab. 1; Fig. 2).

From the perspective of the integration of RFID sensors, a slot was designed within the modular system taking into account three main elements:

- the geometry of the sensors;
- the position of the casing containing the sensor in the panel thickness;
- the integration and connection between the sensor and the panel.

In terms of the first point, three different slot typologies were designed because the sensors to be used have three different geometries. In relation to the position of the casing containing the sensor in the thickness of the panel, different tests were carried out in order to understand which was the position that, among the ones hypothesised, least affected the communication between the elements of the sensory system. Due to its ability to ensure the best signal transmission, the slot was positioned towards the panel side in contact with the internal environment of the smart factory and, in particular, in the centre of this panel.

The slot was designed in such a way as to be placed immediately before the last layer of corrugated cardboard in order to be completely hidden, to prevent the damage of the subsequent surface finishing of the panel and to protect

the sensor from any manipulation or extraction by unauthorised personnel. Regarding the fixing between sensor and layers, a dry connection with metal screws was provided. This system is consolidated by the analysis of commercial cardboard products in addition to the fact that the three types of sensors are already equipped with slots to house the screws.

The assembly process involves three phases described in figure 3. Firstly, the individual layers will be glued with the exception of the last one, and the slot will be prepared according to the design indications. Subsequently, one of the three types of sensors will be housed and fixed and lastly, the remaining layer will be glued (Fig. 3).

The integration system designed and described is such that, in the event of a necessary replacement/control of the sensor, only the last layer of the panel

would be sacrificed, recovering the sensor without difficulty, unlike some already patented systems that contemplate a sensor fixing through glues which, in case of removal, would cause damage and/or loss of the entire panel. The design phase illustrated was conducted taking into account the machinery already supplied by the co-proposer, in order to guarantee the industrial manufacturing of the product; its final destination will be that of marketing. The production speed achieved is approximately ten minutes for the BC corrugated cardboard panel and fifteen minutes for the EE one. These times include the realisation of the slot and the housing of the RFID.

Different types of tests and laboratory trials were carried out on the prototypes to verify the achievement of the MULTIFID goals. Specifically, in addition to the calculation pursuant to UNI

04 | Produzione dei pannelli e test. Linea A, alcuni dei prototipi prodotti e delle macchine industriali impiegate. Linea B, finitura superficiale del pannello, scatti inerenti le fasi di costruzione della Guarded Hot Box e di test. Linea C, output grafico rispettivamente di analisi termoflussimetrica (a sinistra), e Guarded Hot Box (a destra), (elaborazione grafica di M. Rotilio)
 Panel production and testing. Line A, some of the prototypes produced and the industrial machines used. Line B, surface finishing of the panel, shots of the Guarded Hot Box construction and testing phases. Line C, graphical output of thermofluximetric analysis (left), and Guarded Hot Box (right) respectively (M. Rotilio elaboration)

Grazie all'impiego di materiale di riciclo ed al citato processo di ottimizzazione della fase di produzione industriale, è stato stimato che il pannello completo di finitura, protezione al fuoco e dotato di sensore, avrà un costo di immissione sul mercato pari a circa 13-15 euro al metro quadrato. Tale valore risulta leggermente inferiore rispetto al costo medio dei più diffusi prodotti edili destinati all'isolamento termico che, però, non sono multifunzionali o intelligenti poiché privi del sistema sensoriale.

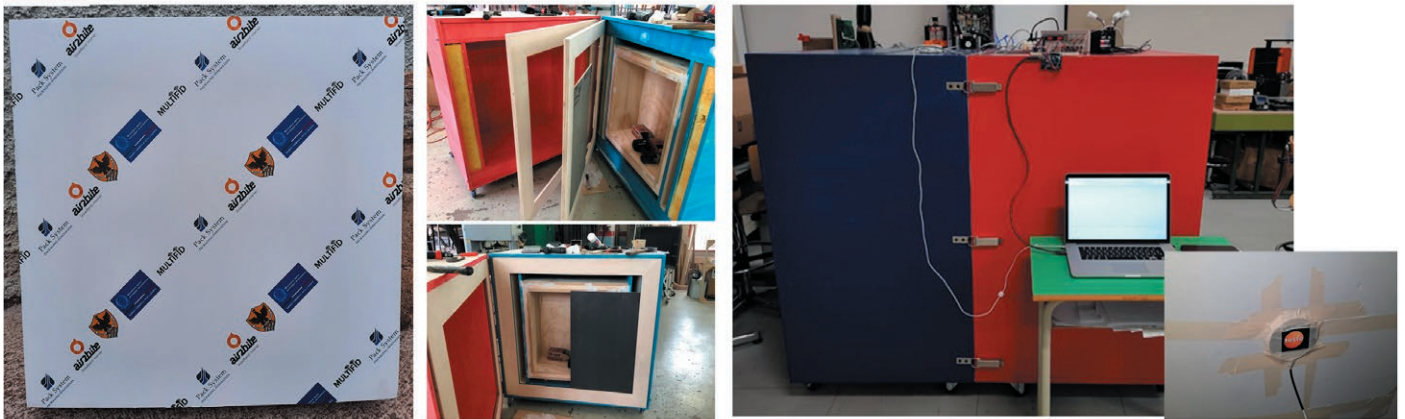
Conclusioni

Il progetto MULTIFId, sebbene ancora in fase di svolgimento per il pannello di tipo "A" e di implementazione per il pannello di tipo "B", ha già permesso di conseguire innovativi risultati nell'ambito delle tematiche dell'economia circolare e dell'Industria 4.0, in linea con le principali normative nazionali e comunitarie in materia. Al fine della sua immissione sul mercato, per il sistema ideato è stato già depositato brevetto industriale, attualmente in corso di defini-

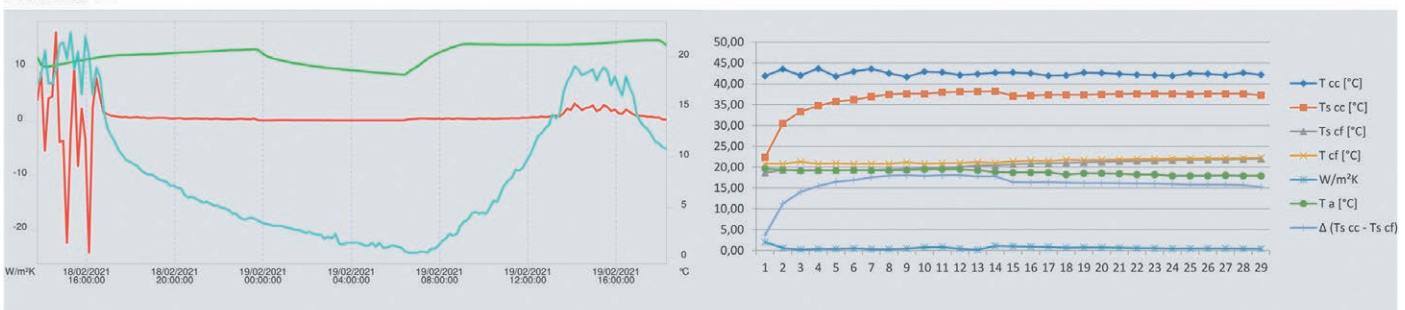
04 |



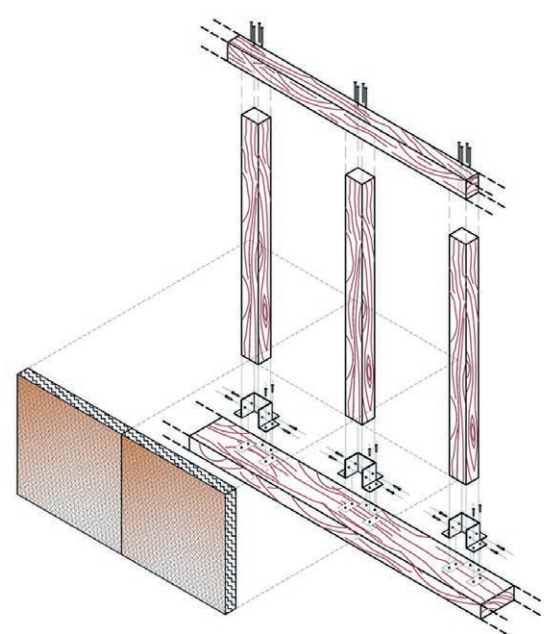
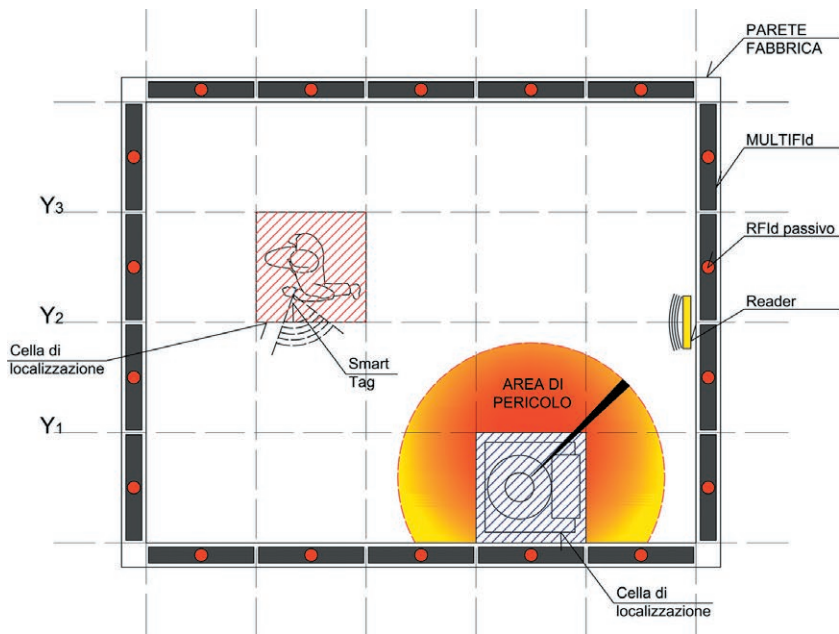
Linea A



Linea B



Linea C



zione. In seguito sarà possibile avviare le procedure di certificazione e le altre previste dal D. Lgs. 106.2017 che adegua la normativa nazionale al regolamento (UE) n. 305.2011. MULTIFid offre numerose potenzialità di sviluppo in relazione alla crescente domanda di gestione e controllo degli edifici intelligenti poiché il sistema sensoriale può essere messo in comunicazioni con ulteriori sistemi smart. Infine, costituisce un valido esempio di fattiva collaborazione tra aziende ed ente di ricerca e si configura come una reciproca opportunità di crescita che ha alla base la condivisione delle risorse, dei mezzi e del know-how.

ISO 6946: 2008, analyses were carried out to verify the thermal conductivity of the panels thanks to the use of the Guarded Hot Box, designed ad hoc by the consultants, and heat flow tests with a heat flow meter. The results achieved prove that the conductivity values of type "B" panels oscillate between 0.044 W/mK and 0.064 W/mK, according to the type (Tab. 1). Therefore, they not only satisfy the project K_{pi} , but they are consistent with the lambda values of other construction products which are used for thermal insulation. Consequently, the designed panel system may be used in order to achieve thermal improvement of the factory envelope (Fig. 4). At the same time as the activities described, which are necessary for the definition of the so-called constructive system, the tasks to define the sensory system were carried out. The MULTI-

Fid architecture was designed with the aim of implementing safety in factories through the control of aspects such as the entry of workers into risk areas and man-machine and man-robot interaction. The panel position on the walls of the factory allows the partition of the internal volume into portions that can be uniquely identified through Cartesian coordinates. In this way, the position of each resource within the volume can always be known if it is equipped with a smart tag. This system may mitigate the risk in many dangerous conditions, such as in the case of an isolated worker in the hypothesis of a man-down recovery, or in the event that an unauthorised operator enters the risk area of a machine/robot. All these things may be managed remotely, through alerts, warnings and direct communications to the rescuers and to the corporate HPPS, Head of the

RINGRAZIAMENTI

La ricerca illustrata è parte del progetto "MULTIFid - Pannelli multifunzionali per le nuove fabbriche intelligenti", finanziato dal Fondo per la Crescita Sostenibile, Sportello Fabbrica Intelligente, D.M. 05.03.2018 Capo III.

Soggetti coinvolti: aziende, 2bite S.r.l. come capofila e Pack System S.r.l. come co-proponente, oltre a due dipartimenti dell'Università degli Studi di L'Aquila in qualità di consulenti. Nello specifico il DIIIE per l'azienda capofila ed il DICEAA per il co-proponente. L'autore pertanto ringrazia la 2bite S.r.l. (T. Gabriele), la Pack System S.r.l. (L. Mastrodicasa) ed i referenti del DIIIE (Prof. V. Stornelli, Prof. F. Cucchiella) e del DICEAA (Prof. P. De Bernardinis).

Prevention and Protection Service. The designed system consists of a tag with chip and antenna, an additional antenna that communicates with tag one through radio waves, a reader that, on the one hand, exchanges data with RFID tags and, on the other, interfaces to a computer to which it is connected via an interface middleware. Moreover, the panel is equipped with humidity sensors for continuous monitoring. Similar to the construction system, the sensory system has also been the subject of many tests and laboratory trials to verify the correct signal transmission and efficient operation. The last planned activity concerns the executive design of the panel fixing system and the design and construction of the "MULTIFid System" box (Fig. 5). This box reproduces the interior of an Intelligent Factory in a prototype version and will allow the sys-

tem to be calibrated through tests and checks, identifying any subsequent issues and possible refinement and optimisation solutions. Thanks to the employment of recycled material and the optimisation process of the industrial production phase mentioned above, it has been estimated that the panel, suit of finishing, fire protection and equipping with a sensor will cost about 13-15 euros per square metre. This value is slightly lower than the average cost of the most popular construction products intended for thermal insulation which, however, are not multifunctional or intelligent due to the lack of the sensory system.

Conclusions

Although still in progress for the type "A" panel and under implementation for the type "B" panel, the MULTIFid project has already enabled the achieve-

REFERENCES

- Asdrubali, F., Pisello, A.L., D'Alessandro, F., Bianchi, F., Fabiani, C., Cornicchia, M. and Rotili, A. (2016), "Experimental and numerical characterization of innovative cardboard based panels: Thermal and acoustic performance analysis and life cycle assessment", *Building and Environment*, Vol. 95, pp. 145-159.
- Binici, H., Aksogan, O., Dincer, A., Luga, E., Eken, M. and Isikaltun, O. (2020), "The possibility of vermiculite, sunflower stalk and wheat stalk using for thermal insulation material production", *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 18, pp. 100567.
- Bourguiba, A., Touati, K., Sebaibi, N., Boutouil, M. and Khadraoui, F. (2020), "Recycled duvets for building thermal insulation", *Journal of Building Engineering*, Vol. 31, pp. 101378.
- Cascone, S.M., Nobile, V., Russo, G., Tomasello, N. and Vitale, M., (2019), "Dalla progettazione alla dismissione del manufatto edilizio secondo i principi dell'economia circolare", *Ingegno e costruzione nell'epoca della complessità, Forma urbana ed individualità architettonica*, Proceedings of Colloqui. AT.e 2019, pp. 920-927.
- Cascone, S.M., Tomasello, N. and Vitale, M. (2020), "Materiali naturali per l'isolamento termico degli edifici", in Cascone, S.M., Margani, G. and Sapienza, V. (Eds.), *New Horizons for Sustainable Architecture*, Proceedings of Colloqui.AT.e 2020, pp. 964-973.
- Ding, L.Y., Zhou, C., Deng, Q.X., Luo, H.B., Ye, X.W., Ni, Y.Q. and Guo, P. (2013), "Real-time safety early warning system for cross passage construction in Yangtze Riverbed Metro Tunnel based on the internet of things", *Automation in Construction*, Vol. 36, pp. 25-37.
- Distefano, D.L., Gagliano, A., Naboni, E., Sapienza, V. and Timpanaro, N. (2018), "Thermophysical characterization of a cardboard emergency kit-house", *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, Vol. 5, n. 3, pp. 168-174.
- Gounni, A., Mabrouk, M.T., El Wazna, M., Kheiri, A., El Alami, M., El Bouari, A. and Cherkaoui, O. (2019), "Thermal and economic evaluation of new insulation materials for building envelope based on textile waste", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 149, pp. 475-483.
- Milovanovic, B., Stirmer, N. and Milicevic, I. (2012), "The sustainable prefabricated wall panel system made of recycled aggregates", *International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction*, Nantes, France.
- Pásztory, Z., Börcsök, Z. and Tsalagkas, D. (2019) "Density optimization for the manufacturing of bark-based thermal insulation panels", in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science - Proceedings of 5th International Conference on Environment and Renewable Energy*, Vol. 307, No. 1, pp. 012007.
- Rotilio M., Pantoli L., Muttillio M. and Annibaldi V. (2018), "Performance Monitoring of Wood Construction Materials by Means of Integrated Sensors", *Key Engineering Materials*, Vol. 792, pp. 195-199.
- Rotilio, M. and De Berardinis P. (2020), "L'economia circolare e l'Industria 4.0 per la sicurezza dei lavoratori. Un nuovo prodotto multifunzionale", in Cascone, S.M., Margani, G., Sapienza, V. (Eds.), *New Horizons for Sustainable Architecture*, Proceedings of Colloqui.AT.e 2020, pp. 834-847.
- Stojanović, G., Radovanović, M., Malešev, M. and Radonjanin, V. (2010), "Monitoring of Water Content in Building Materials Using a Wireless Passive Sensor", *Sensors*, Vol. 10, pp. 4270-4280.
- Strangfeld C. and Klewe T. (2021), "Hygrometric Moisture Measurements Based on Embedded Sensors to Determine the Mass of Moisture in Porous Building Materials and Layered Structures", in Rizzo P. and Milazzo A. (Eds.) *European Workshop on Structural Health Monitoring*. Proceedings of EWSHM 2020, Lecture Notes in Civil Engineering..
- Strangfeld, C., Johann, S. and Bartholmai, M. (2019), "Smart RFID Sensors Embedded in Building Structures for Early Damage Detection and Long-Term Monitoring", *Sensors*, Vol. 19, pp. 5514.
- Valero, E., Adán, A. and Cerrada, C. (2015), "Evolution of RFID Applications in Construction: A Literature Review", *Sensors*, Vol. 15, pp. 15988-16008.
- Viel, M., Collet, F. and Lanos, C. (2019), "Development and characterization of thermal insulation materials from renewable resources", *Construction and Building Materials*, Vol. 214, pp. 685-697.
- Wenig J.H., Loh C.H., Lynch J.P., Lu K.C., Lin P.Y. and Wang Y. (2008), "Output-only modal identification of a cable-stayed bridge using wireless monitoring systems", *Engineering Structures*, Vol. 30, n. 7, pp. 1820-1830.
- Wu, F., Wu, T. and Yuce, M.R. (2019), "An Internet-of-Things (IoT) Network System for Connected Safety and Health Monitoring Applications", *Sensors*, Vol. 19, n. 1, pp. 21.
- Zhou, X., Zheng, F., Li, H. and Lu, C. (2010), "An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers", *Energy and Buildings*, Vol. 42, n. 7, pp. 1070-1074.
- ment of innovative results in the area of circular economy and Industry 4.0, in harmony with the main national and EU regulations on this matter. In order to be placed on the market, an industrial patent has already been registered for the designed system, currently under definition. Subsequently, it will be possible to start the certification procedure and the others provided for by Legislative Decree 106.2017 which adapts the national legislation to Regulation (EU) no. 305.2011. MULTIFID offers several potential developments in relation to the growing demand for the management and control of intelligent buildings because the sensory system may be put in communication with further smart systems. Lastly, it represents a valid example of effective collaboration between companies and research institutes and it is configured as a mutual growth opportunity based on the sharing of resources, means and know-how.

ACKNOWLEDGMENTS

The research illustrated is part of the "MULTIFID - Multifunctional panels for new smart factories" project, financed by the Fund for Sustainable Growth, Smart Factory Desk, Ministerial Decree 05.03.2018 Chapter III. Stakeholders: companies, 2bite S.r.l. as leader and Pack System S.r.l. as co-proposer, in addition to two departments of the University of L'Aquila as consultants. Specifically, Department DIIIE for the lead company and Department DICEAA for the co-proposer. Therefore, the author thanks 2bite S.r.l. (T. Gabriele), Pack System S.r.l. (L. Mastrodicasa) and those responsible for the research for DIIIE, Prof. V. Stornelli and Prof. F. Cucchiella, and for DICEAA, Prof. P. De Berardinis.