

Nuovi protocolli di valutazione per il miglioramento della resilienza dell'involucro edilizio

Just Accepted: November 22, 2023 Published: June 10, 2024

RICERCA E
SPERIMENTAZIONE/
RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

Martino Milardi¹, <https://orcid.org/0000-0001-5040-2778>

Mariateresa Mandaglio¹, <https://orcid.org/0009-0005-6399-2582>

Enrico Sergio Mazzucchelli², <https://orcid.org/0000-0001-7722-6700>

Paolo Rigone², <https://orcid.org/0000-0002-3416-8747>

Paolo Giussani², <https://orcid.org/0009-0008-0559-3948>

¹ Dipartimento di Architettura e Territorio, Università Mediterranea di Reggio Calabria, Italia

² Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, Italia

mmilardi@unirc.it

mariateresa.mandaglio@unirc.it

enrico.mazzucchelli@polimi.it

paolo.rigone@polimi.it

paolo.giussani@polimi.it

Abstract. Le attuali norme sull'insieme di requisiti da soddisfare da parte dell'involucro edilizio non sono più solamente legate ad aspetti di efficienza energetica o di garanzia di durata nel tempo, ma anche a nuovi scenari prestazionali, riguardanti sistemi tecnologici rivolti a logiche di adattamento, mitigazione e resilienza ai sempre più frequenti eventi climatici estremi. La ricerca si propone di analizzare cause, effetti e potenziali strategie per aumentare la resilienza dell'involucro edilizio in caso di eventi estremi proponendo soluzioni per la riduzione delle conseguenze dell'impatto di detriti volanti sull'involucro edilizio. Il contributo è frutto di un'attività di ricerca condotta all'interno del Progetto di ricerca *HORIZON METABUILDING LABS Innovation*.

Parole chiave: Cambiamento climatico; Detriti volanti; Involucro edilizio resiliente; Nuovi regolamenti; Validazione prestazioni.

Introduzione

È ormai evidente come in questi ultimi anni il tema dei cambiamenti climatici si sia affermato in modo sempre più rilevante portando con sé una maggiore consapevolezza degli impatti che questo provoca in termini umani, ambientali, sociali ed economici.

Già nel 1966 Mitchell indica che il termine “*climate change*” si riferisce a “tutte le forme di incostanza climatica, indipendentemente dalle loro natura statistica o cause fisiche”.

L'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), invece, lo delinea come “una variazione statisticamente significativa dello stato medio del clima o della sua variabilità, persistente per un periodo esteso, causata sia dalla sua variabilità naturale, sia dall'attività umana”, ovvero quando le cause umane sono attribuibili e fanno riferimento alla variabilità climatica.

New assessment
protocols to improve
building envelope
resilience

Abstract. The current regulations on building envelope requirements are no longer related only to aspects of energy efficiency or guarantee of durability over time, but also to new performance scenarios concerning technological systems in relation to adaptation, mitigation and resilience to increasingly frequent extreme climate events. The research aims to analyse causes, effects and potential strategies to increase the resilience of the building envelope in case of extreme events, proposing solutions to reduce the consequences of the impact of flying debris on the building envelope. The contribution is the result of a research activity conducted within the *HORIZON METABUILDING LABS Innovation* research project.

Keywords: Climate change; Wind-borne debris; Resilient building envelope; New regulation; Performance validation.

Al contempo, l'UNFCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) afferma che non si può attribuire solo all'uomo la principale responsabilità dei cambiamenti climatici in atto, poiché il mutamento del clima rappresenterebbe un fenomeno ciclico.

Lo studio del clima e dei suoi cambiamenti rappresenta, quindi, un esempio emblematico della sfida intellettuale ed operativa che oggi viene posta dai sistemi complessi e i modelli matematici rappresentano gli strumenti ideali per coglierne il comportamento.

In particolare, gli edifici affrontano i maggiori rischi di danni causati dagli impatti previsti del cambiamento climatico, tra cui eventi estremi sempre più frequenti caratterizzati da velocità del vento oltre i limiti considerati nelle normative (secondo le N.T.C. 2018), aumento delle ondate di calore, inondazioni, incendi, etc.

Le attuali normative sull'insieme di requisiti da soddisfare da parte dei moderni involucri edilizi, nonché le nuove esigenze abitative riguardo le aspettative di comfort da parte degli utenti, non sembrano essere più soltanto legate alla richiesta di efficienza energetica o alle garanzie di durata nel tempo, ma a nuovi ventagli prestazionali da offrire, riguardanti sistemi tecnici sempre più rivolti a logiche di integrazione in rapporto ai sempre più frequenti eventi estremi.

Durante eventi caratterizzati da venti estremi, uno dei rischi maggiori è legato al distacco di componenti e parti di edifici

Introduction

In recent years climate change issues have become increasingly relevant, bringing a greater awareness of the impacts they can cause in human, environmental, social and economic terms. Already in 1966, Mitchell indicated that the term “*climate change*” refers to “all forms of climatic inconstancy, regardless of their statistical nature or physical causes”.

The IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), however, defines climate change as “a statistically significant variation in the average state of the climate or of its variability, persistent for an extended period, caused either by its natural variability or by human activity”, i.e. when human causes can be referred to climate variability.

At the same time, the UNFCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) states that the main

responsibility for ongoing climate change cannot be attributed only to human activities, since climate change would represent a cyclical phenomenon.

Therefore, the study of the climate and its changes is an emblematic example of the intellectual and operational challenge related to complex systems, and mathematical models are the ideal tools for understanding their behaviour.

In particular, buildings face the major risks of damage caused by the expected impacts of climate change, including increasingly frequent extreme events characterised by wind speeds far beyond the limits considered in standards (according to the 2018 N.T.C.), increased heat waves, floods, fires, etc. The current regulations on building envelope requirements, as well as new users' comfort expectations, are no

e altri arredi urbani: tegole, elementi di facciata, antenne, etc. Tali elementi possono essere trasportati dal vento, diventando detriti volanti (*flying debris*) che rappresentano una grave minaccia per le persone e beni immobili, arrivando a colpire edifici circostanti a velocità molto elevate (ASCE, 2014; Butler *et al.*, 2012).

L'effetto dell'impatto sull'involucro edilizio dei flying debris deve essere considerato al fine di evitare rotture nelle facciate, con conseguente incremento delle pressioni positive e negative e danneggiamenti per infiltrazioni d'acqua negli ambienti interni. Attualmente, nei codici nazionali ed europei, le prestazioni di resilienza dell'involucro edilizio nei confronti dei detriti volanti non sono ancora incluse. Al contrario, altri paesi hanno già sviluppato linee guida di progettazione, test e sistemi di certificazione per migliorare la resistenza degli edifici ai detriti volanti (Laboy *et al.*, 2012), al fine di prevenire la rottura dell'involucro edilizio, guasti sistemici e infiltrazioni d'acqua provocate dal vento (Henderson *et al.*, 2018; Herseth *et al.*, 2012). In questo scenario, il settore delle costruzioni richiede sempre di più uno sviluppo di metodologie e strumenti innovativi per limitare gli impatti dei cambiamenti climatici sull'ambiente costruito da un lato e, soprattutto, per mitigare i fenomeni derivanti dalle dinamiche dell'ambiente costruito che innescano a loro volta cambiamenti climatici alla piccola e alla grande scala.

Stato dell'arte

Gli effetti del cambiamento climatico sono ormai chiari in molte regioni. Nell'ultimo decennio è stato registrato un aumento sia della frequenza che della velocità massima del vento in ambito italiano ed europeo. Durante questi eventi estremi, i

rischi per gli edifici sono dovuti al distacco di materiali ed elementi da edifici e altre strutture antropiche: tegole, elementi di facciata, antenne, et c. possono essere trascinati dal vento, diventando detriti volanti in grado di causare danni a persone e cose (ASCE, 2014; Butler *et al.*, 2012).

I recenti eventi di vento estremo in Italia (Fig. 1) e in Europa dimostrano che gli edifici esistenti presentano molti elementi vulnerabili (Pastori *et al.*, 2023). La combinazione di maggiori azioni del vento, il vecchio patrimonio edilizio ed eventi meteorologici con caratteristiche differenti dal passato (si considerino ad esempio i frequenti eventi di "downburst") sono le ragioni principali dei danni indotti dal vento e sono il settore dove è richiesto un approfondimento della ricerca.

Gli organi di governo delle aree soggette a eventi meteorologici estremi (Florida, Hong Kong, Giappone, Australia) hanno implementato diverse misure per mitigare l'effetto del vento sull'ambiente costruito e sono stati condotti studi e osservazioni specifiche delle conseguenze su edifici e sicurezza umana dei principali uragani, tifoni e tornado (FEMA, 1993; CTS, 2017). Tali misure hanno un unico obiettivo: prevenire i danni a persone e cose dovuti ai detriti volanti adottando due serie di misure: da un lato, la riduzione della probabilità di distacco di elementi e generazione di detriti (migliorando la resistenza al vento degli elementi costruiti dall'uomo), dall'altro, mitigando le conseguenze dell'impatto di detriti volanti, stabilendo linee guida progettuali e metodologie di prova per garantire la resistenza dell'involucro edilizio.

È pertanto urgente comprendere lo scenario e l'evoluzione di eventi di vento estremo in Italia sia in termini di caratteristiche, che di intensità. Ciò deve essere collegato ad uno studio



approfondito sull'ambiente costruito italiano (rappresentativo anche dei paesi europei che si affacciano sul Mar Mediterraneo) per evidenziare il potenziale rischio causato da detriti volanti e le possibili soluzioni di tale problema. Per quanto riguarda i detriti volanti, sono stati condotti diversi studi incentrati sull'inizio del volo e sulla traiettoria, ma la loro estensione a differenti componenti edilizi è complessa, perché tutte le caratteristiche del potenziale detrito volante (es. forma, massa per unità di area, etc.) hanno un ruolo chiave nella definizione della traiettoria di volo. Oltre alla traiettoria dei *flying debris*, è stata studiata anche la potenziale velocità del vento in grado di danneggiare oggetti nell'ambiente urbano (Holmes 2015).

Per quanto riguarda la resilienza dell'involucro edilizio, le principali procedure standard internazionali di riferimento per le facciate sono (Letchford, 2018):

- ASTM E 1886 (ASTM 2019);
- ASTM E 1996 (ASTM 2017);
- FEMA P-361 (FEMA 2015);
- AS/NZS 1170.2:2011 (AS/NZS 2016).

Tali norme consistono in una prova di impatto, in funzione dell'ubicazione e del livello di importanza dell'edificio, da effettuarsi su specifici punti di un involucro vetrato e dell'intelaiatura di una facciata continua. Successivamente, limitatamente agli standard statunitensi, è richiesto un test ciclico di pressione sulla facciata, a seconda dell'ubicazione dell'edificio. In generale, le norme si basano sull'evidenza dell'esperienza pratica (report Miami Dade County, 2006) e, nonostante funzionino efficacemente, mancano di un lavoro teorico sistematico a supporto (Lin *et al.*, 2006). Di conseguenza, è molto difficile, se non impossibile, la loro adozione in un contesto ambientale diffe-

longer related to the request for energy efficiency or guarantees of durability over time only, but to new ranges of performance concerning technical systems increasingly aimed at integration in relation to growing incidence of extreme weather events.

One of the major risks of events characterised by extreme winds is linked to the detachment of components and parts of buildings and other street furniture, such as tiles, façade elements, aerials, etc. These elements can be carried by the wind, thus becoming flying debris, a serious threat to both people and property, hitting surrounding buildings at very high speeds (ASCE, 2014; Butler *et al.*, 2012).

The effect of the impact of flying debris on the building envelope must be considered to avoid breakages in the façades, with a consequent increase in positive and negative pressures and

damage due to water infiltration into indoor environments. Currently, the resilience performance of the building envelope against flying debris is not yet included in national and European law. Instead, other countries have already developed design guidelines, testing and certification systems to improve the resistance of buildings to flying debris (Laboy *et al.*, 2012) in order to prevent building envelope failure, systemic failures and water infiltration caused by wind (Henderson *et al.*, 2018; Herseth *et al.*, 2012). In this scenario, the construction sector requires the development of innovative methodologies and tools to limit the impacts of climate change on the built environment and, above all, to mitigate phenomena deriving from the dynamics of the built environment that can trigger climate change at small and large scale.

rente, perché ogni paese/regione è caratterizzato da condizioni meteorologiche diverse e, cosa ancora più importante, da diverse tipologie di possibili detriti volanti.

Obiettivo e metodologia

L'obiettivo della ricerca è quello di migliorare la resilienza dell'edificio ai cambiamenti climatici, concentrandosi sulla resistenza dell'involucro edilizio in caso di eventi estremi di vento (De La Guardia, 2012), proponendo soluzioni per la riduzione delle conseguenze dell'impatto di detriti volanti (*wind-borne flying debris*) sull'involucro edilizio stesso. L'obiettivo è in linea con il progetto di ricerca HORIZON 2020 *Metabuilding Labs* (MBLabs), progetto di innovazione che ha lo scopo di fornire alle piccole e medie imprese (PMI) europee del settore delle costruzioni un facile accesso a un'ampia rete di strutture di prova di alto valore che consentono loro di sviluppare e testare soluzioni di involucro innovative per edifici di nuova generazione. La metodologia di ricerca principale consiste nell'analisi dei dati e della letteratura esistenti, nella progettazione di nuovi apparati e procedure di prova attraverso studi sperimentali e attività di laboratorio. L'approccio metodologico di tipo deduttivo è necessario all'analisi del fenomeno dell'effetto del forte vento con le sue possibili pericolosità, non solo per gli edifici "sorgente" di detriti volanti (Fig. 2), ma anche per gli effetti subiti e indotti sugli edifici "bersaglio" (*target*).

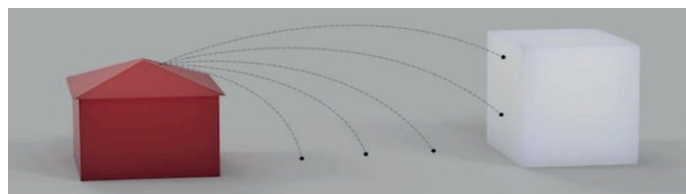
Una specifica serie di simulazioni, rilievi, elaborazioni e valutazioni riguarda la complessità fenomenologica dell'"elemento vento", indirizzate allo studio del vento estremo in ambiente urbano, con particolare attenzione alla definizione da un lato dell'entità del pericolo, dall'altro alla definizione di repertori

State of the art

Evidence of climate change is now clear in many areas. In the last decade, an increase in both wind frequency and maximum speed has been recorded in Italy and Europe. During these extreme weather events, the risks to buildings are due to the detachment of materials and elements from buildings and other anthropic structures, such as tiles, façade elements, aerials, etc., which can be dragged by the wind, becoming flying debris capable of causing damage to both people and property (ASCE, 2014; Butler *et al.*, 2012). Recent extreme wind events in Italy (Fig. 1) and Europe reveal that existing buildings have many vulnerable elements (Pastori *et al.*, 2023). The combination of stronger wind action, the old building stock and meteorological events with characteristics that differ from the past (consider for example

the frequent "downburst" events) are the main reasons for wind-induced damage. This is the field where further research is required.

Governing bodies in areas that are prone to extreme weather events (i.e.: Florida, Honk Kong, Japan, Australia) have implemented several measures to mitigate the effect of wind on the built environment, with special focus on wind events. Studies and field observations have been conducted on the consequences of major past and recent hurricanes, typhoons and tornadoes on the built environment and for human safety (FEMA, 1993; CTS, 2017). Such measures have one single goal, precisely to prevent damages to people and properties caused by flying debris. This objective is sought by adopting two sets of measures: on the one side, reducing the likelihood of the flying debris phenomenon by improving



tecnici e linee guida sia per soluzioni progettuali, che per piani di intervento.

L'obiettivo è lo sviluppo di strategie di mitigazione innovative per migliorare la resilienza dell'ambiente costruito, concentrandosi sull'involucro edilizio. Si ritiene che l'insieme dei macchinari e delle strumentazioni di cui i laboratori dispongono, nonché il ventaglio di simulazioni prodotte, possano consentire di valutare, e quindi certificare, non solo le caratteristiche prestazionali degli involucri edilizi, ma anche di facilitare lo sviluppo di nuove prassi sperimentali, favorendo la definizione di configurazioni di test che non sono contemplate dalle metodologie di prova correnti.

Nello specifico, le fasi e le azioni che si sviluppano, attraverso un approccio metodologico strategico, riguardano la definizione di una serie di informazioni sistematizzate che hanno il duplice ruolo di servire, da un lato, alla restituzione dei dati dinamici riferiti a specifici contesti ambientali, dall'altro di partecipare alla formazione di un sistema di azioni/strumentazioni utili all'avanzamento delle conoscenze nel campo delle strategie per la lotta al cambiamento climatico.

Negli ultimi quattro decenni è stata analizzata la modalità di volo di varie tipologie di detriti, considerando le caratteristiche dell'oggetto e la velocità del vento. Sono state analizzate tre caratteristiche geometriche dei detriti: gli oggetti compatti, gli oggetti piani e le aste. Pertanto, è possibile valutare la potenziale velocità del vento che causa il distacco e la "rottura" (Holmes, 2015) di vari oggetti nell'ambiente costruito.

Prendendo in considerazione gli obiettivi principali della ricerca, la costruzione di matrici tematiche, che mettono in relazione assetti urbani con i fenomeni derivanti dal cambiamento

climatico, hanno il fine ultimo di realizzare un set di possibili indicatori robusti, anche con peculiari caratteri specifici, come quelli di derivazione termofisica e aerodinamica, attraverso i quali applicare le simulazioni dell'effetto del vento. Da questo punto di vista, i processi applicativi prevedono la costruzione di nuovi ciclogrammi (*method statement*) e l'elaborazione di nuovi protocolli di testing sia per attività sperimentali sia per certificazioni in ambito normativo (europeo e nazionale).

L'opportunità di poter disporre di laboratori di prova per involucri edilizi costituisce un valore aggiunto alla ricerca, concretizzando azioni di sperimentazione applicata con risultati di alta affidabilità. Inoltre, il contributo dei laboratori di prova consentirà una continua fase di validazione dei risultati ottenuti e l'attivazione di processi di *feedback* al fine di poter implementare un nuovo apparato metodologico e orientare nuovi standard di valutazione.

L'originalità e l'innovazione della ricerca sono significative nello sviluppo di nuovi standard per la resilienza degli involucri edilizi nei confronti dell'impatto di detriti volanti in caso di eventi climatici estremi, da introdurre nel quadro normativo italiano di standardizzazione, nella fase di *testing* degli involucri edilizi attraverso innovativi apparati di *test* per valutare le prestazioni di resistenza all'impatto dei detriti volanti.

La metodologia, a carattere operativo ma orientata da feedback anche sperimentali, è sviluppata attraverso azioni di differenti periodicità e intensità, riferite a destinatari diretti e indiretti della ricerca.

La ricerca condivide i risultati in forma dinamica attraverso la piattaforma "*Innovation Ecosystem*", assicurandone una forte visibilità. Le attività di trasferimento hanno l'obiettivo di met-

the resistance of man-made elements to wind; on the other side, mitigating the consequences of flying debris by defining design guidelines and testing methodologies to ensure the resistance of the building envelope to the impact of flying debris.

Therefore, it is urgent to understand the scenario and the evolution of extreme wind events in Italy both in terms of characteristics and intensity. This scenario needs to be linked with an in-depth study of the Italian built environment (also representative of European countries bordering the Mediterranean Sea) to highlight the potential risk of flying debris and its solution. Regarding wind-borne flying debris, several studies have been conducted focusing on detaching and flight trajectory, but their extension to different building components is difficult because all the characteristics of

the potential flying debris (e.g. shape, mass per unit area, etc.) have a key role in defining the flight path. Furthermore, the potential wind speed capable of damaging objects in the urban environment has also been studied (Holmes 2015).

Concerning building envelope resilience, the main international reference standard procedures for façades are (Letchford, 2018):

- ASTM E 1886 (ASTM 2019);
- ASTM E 1996 (ASTM 2017);
- FEMA P-361 (FEMA 2015);
- AS/NZS 1170.2:2011 (AS/NZS 2016).

These standards consist of an impact test, depending on the location and level of importance of the building, to be carried out on specific points of a glass envelope and of the framework of a curtain wall. Subsequently, limited to US standards, a cyclic façade pres-

sure test is required, depending on the location of the building. In general, standards are based on evidence from practical experience (report Miami Dade County 2006) and, despite working effectively, they lack a systematic theoretical work to support them (Lin *et al.*, 2006). Consequently, it is very difficult, if not impossible, to adopt them in a different environmental context because each country/region is characterised by different meteorological conditions and, even more importantly, by different typologies of possible flying debris.

Objective and methodology

The objective of the described research is to improve building resilience against climate change, focusing on the resistance of the building envelope to extreme wind events (De La Guardia, 2012), and proposing solutions to re-

duce the consequences of the impact of wind-borne flying debris on the building envelope. The objective is in line with the HORIZON 2020 Metabuilding Labs (MBLabs) research project, an innovation project that aims to provide European small and medium-sized enterprises (SMEs) in the construction sector with easy access to a broad network of high value testing facilities, which enable them to develop and test innovative envelope solutions for next generation buildings.

The project's core research methodology consists in analysing existing data and literature, and in designing new testing apparatus and procedures through experimental studies and laboratory activities. The deductive approach is necessary to perform the analysis of strong wind phenomena not only related to the "source" buildings (Fig. 2) but also considering the

tere in evidenza come i risultati di questa ricerca abbiano un significato innovativo, dovuto alla capacità di supportare lo sviluppo di nuovi standard per la resilienza all'impatto dei detriti volanti sugli involucri edilizi.

Nell'insieme, il programma di ricerca si focalizza su:

- valutazione dell'azione del vento e dei suoi effetti sull'involucro edilizio, sui possibili danni e sulla generazione dei *flying debris*;
- analisi del rischio e definizione di strategie di mitigazione per prevenire i danni causati dal vento agli edifici e il verificarsi del fenomeno dei detriti volanti;
- definizione della forza d'urto e le conseguenze degli impatti di detriti volanti sugli edifici, con particolare attenzione alle loro facciate;
- progettazione e la costruzione di strumenti e attrezzature per riprodurre in laboratorio l'impatto dei detriti volanti sugli involucri edilizi e la definizione della metodologia di prova,
- proposta di modifiche ai codici e alle pratiche di progettazione per ridurre gli effetti dei *flying debris* sull'ambiente costruito.

Risultati della ricerca

La ricerca si è sviluppata partendo dall'analisi di dati e letteratura ad oggi disponibili nella progettazione di nuovi apparati e di procedure di prova, attraverso studi sperimentali e attività di laboratorio. A tal fine, la partecipazione al progetto HORIZON 2020 *Metabuilding Labs (METAclustered, SME-oriented European Open Innovation Test Bed for the BUILDING envelope materials industrial sector using a harmonised and upgraded technical*

effect on "target" buildings.

A specific series of simulations, surveys, elaborations and evaluations will concern the phenomenological complexity of the "wind element". They study extreme wind in the urban environment, with particular attention to defining the magnitude of the hazard and also to the purpose of technical repertoires and guidelines for both design solutions and intervention plans. The research aims to identify a wide range of mitigation strategies, particularly developing wind-borne debris resilient building envelopes. The set of machinery and instrumentation available to the laboratories and the range of simulations produced allow to assess and then certify, not only the performance characteristics of building envelopes, but also the development of experimental practices, favouring the definition of new configurations that

are not contemplated by current test methodologies.

Specifically, the phases and actions developed through a strategic methodological approach concern the definition of a series of systematised information, which has the dual role of serving the restitution of dynamic data referring to specific contexts and also of participating in the entire range of actions/instruments useful for the advancement of knowledge in the field of strategies for the fight against climate change.

Over the past four decades, the flight of various types of debris has been analysed taking into account the characteristics of the object and the wind speed. Three geometric characteristics of the debris were analysed, precisely compact objects, flat objects and rods. Hence, the potential failure wind speed of various objects in the urban envi-

framework and living LABS), che ha come tema lo sviluppo e l'innovazione dell'involucro, ha permesso l'accesso a un ecosistema dell'innovazione e a piattaforme di test per avere una elaborazione strategica dei risultati che saranno disseminati in forma dinamica attraverso la piattaforma "*Innovation Ecosystem*".

Le fasi della ricerca si delineano in tempi, azioni, criteri e strumenti indirizzati allo studio degli effetti del vento (con velocità superiori al limite previsto dalle N.T.C. 2018) in ambiente urbano, con particolare attenzione alla definizione di rischio, definizione di repertori tecnici e linee guida, sia per soluzioni progettuali, sia per piani integrati di intervento. Ciò al fine di identificare efficaci strategie di mitigazione, identificando gli elementi costruttivi da rinforzare per evitare il loro cedimento sotto l'azione di venti estremi (edifici "sorgente"), classificando gli effetti di potenziali impatti di detriti volanti sull'involucro di edifici "bersaglio", e definendo nuovi protocolli di valutazione della resilienza dell'involucro edilizio.

L'identificazione degli elementi dell'analisi e la loro caratterizzazione tecnologica è fondamentale al fine di comprendere il motivo del loro fallimento in caso di eventi meteorologici estremi. Questi elementi sono specifici del contesto e possono differire dagli elementi che si danneggiano in altre aree geografiche (Fig. 3). La caratterizzazione tecnica e tecnologica dell'involucro edilizio è pertanto fondamentale per la completa comprensione del meccanismo di cedimento sotto l'azione del vento. L'identificazione degli elementi edilizi più frequentemente danneggiati, le fonti di potenziali detriti volanti e gli eventi atmosferici che hanno causato il danno è il primo risultato dello studio, utile a comprendere i danni specifici e le loro cause costruttive. Questi risultati sono tradotti in una serie di documenti tecnici che sup-

pliment were investigated (Holmes 2015).

Considering the main objectives of the research, the construction of thematic matrices, which relate urban settings with phenomena deriving from climate change, have the ultimate goal of creating a set of possible robust indicators, even with specific characteristics, such as those of thermophysical and aerodynamic derivation, to be adopted for wind effect simulations. From this perspective, the application processes envisage the construction of new cyclograms (method statements) and the development of new testing protocols both for experimental activities and for certifications in the regulatory field (European and national).

The opportunity to have testing laboratories specific for building envelopes constitutes an added value to the research, performing specific testing

procedures with highly reliable results. Furthermore, the contribution of the laboratory facilities will allow to keep the results updated and validated, following feedback processes in order to implement a new methodological approach and guide new standards and assessment criteria.

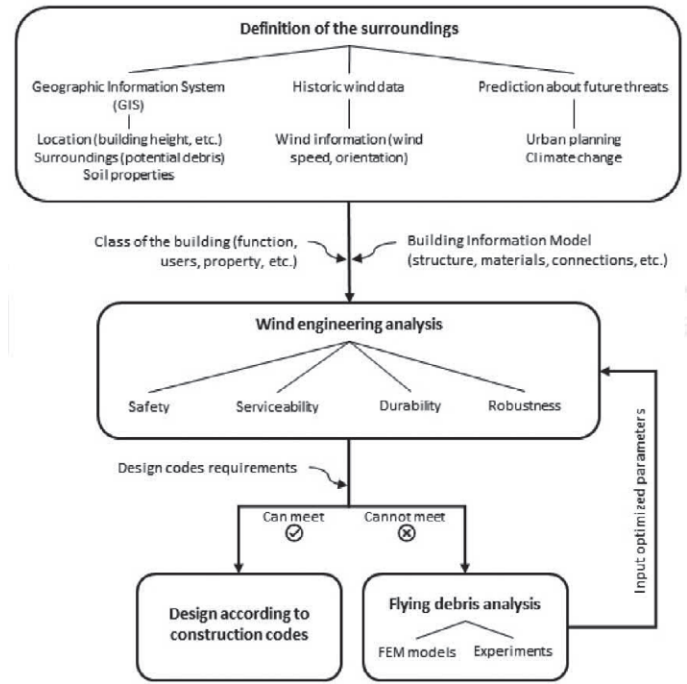
The innovative feature of the research is significant for the development of new standards for flying debris impact resilience of building envelopes, in case of extreme climatic events, during the testing phase of building envelopes through innovative test equipment in order to evaluate the resistance performance to the impact of flying debris. These standards should be introduced in the Italian regulatory framework for standardisation. The methodology is supported by experimental feedback obtained by actions on different periodicity and intensity, referring

portano le industrie specifiche per adattare i loro prodotti per la prevenzione della formazione dei *flying debris*.

Un apporto qualificato a tutto il progetto di ricerca deriva dal contributo delle consulenze climatologiche, di alcune Università e imprese innovative partner del progetto di ricerca Horizon “METABUILDING LABS” che copre alcuni versanti specialistici nel campo degli involucri edili e dell’ambiente costruito in genere. La procedura di prova e l’apparato necessario per condurre i test differiscono da quelli disponibili a livello internazionale perché mirano a basarsi su specifiche tipologie di *flying-debris*, individuate attraverso la valutazione del fenomeno nel contesto italiano. L’obiettivo dei *test* (Fig. 4) è quello di calibrare e mettere a punto l’apparato di prova e di identificare i vetri che soddisfano la minima resistenza all’urto ai detriti volanti. Ciò al fine di identificare le caratteristiche progettuali di una facciata resistente all’impatto con detriti volanti, che sarà successivamente costruita e testata con l’obiettivo di verificare i risultati del metodo di progettazione e comprendere la procedura di test ottimale.

Il protocollo di prova risultato della ricerca (la cui procedura è illustrata in Fig. 5) si propone di analizzare il comportamento di componenti di facciata trasparenti prevedendo una serie di prove atte a determinare la permeabilità all’aria o all’acqua, caratterizzare le prestazioni strutturali, le capacità di resistenza agli urti, la resistenza a cicli di vento forte e continuo e resistenza ai *flying debris* durante un evento estremo per raggiungere l’obiettivo di migliorare la resilienza dell’ambiente costruito a fenomeni di vento estremo.

La costruzione di matrici tematiche che mettono in relazione i contesti urbani con i fenomeni correlati ai cambiamenti climatici ha l’obiettivo di creare un insieme di indicatori per valutare e



mitigare le conseguenze di tali eventi. I processi applicativi prevedono lo sviluppo di nuovi protocolli di prova e la definizione di nuove apparecchiature di test in grado di simulare le mutate condizioni di stress e sollecitazione dell’involucro edilizio, sia per l’innovazione delle attività sperimentali future, sia per il trasferimento delle conoscenze acquisite e per l’avanzamento dell’ambito normativo, europeo e nazionale. Essendo la ricerca ancora in corso i risultati sono da considerarsi intermedi.

Conclusioni e sviluppi futuri

La ricerca qui presentata introduce per la prima volta nel contesto europeo e nella pratica edilizia italiana il concetto di resistenza all’urto di detriti volanti sull’involucro edilizio. Lo studio è condotto per promuovere un nuovo approccio al fine di implementare un nuovo apparato

to direct and indirect audiences. The results of the research are shared following a dynamic approach through the “Innovation Ecosystem” platform. This aspect ensures strong visibility. The sharing activities aim to highlight how the results of this research have an innovative impact due to the ability to support the development of new standards regarding the resilience of building envelopes to the impact of wind-borne flying debris.

Overall, the research programme focuses on:

- evaluation of the wind action and its effects on the building envelope, on possible damage and on the generation of flying debris;
- risk analysis and definition of mitigation strategies to prevent wind-induced damages to buildings, and the flying debris phenomenon;
- definition of the impact strength

and the consequences of flying debris impacts on buildings, with a focus on their façades;

- design and construction of tools and equipment to reproduce, in the laboratory, the impact of flying debris on building envelopes and to define the testing methodology;
- proposal of changes to laws and design practices to reduce the effects of flying debris on the built environment.

Research results

The research has been developed from the analysis of data and literature currently available in the design of new apparatus and test procedures through experimental studies and laboratory activities. To this end, participation in the HORIZON 2020 Metabuilding Labs project (METAclustered, SME-oriented European Open Innovation

Test Bed for the BUILDING envelope materials industrial sector using a harmonised and upgraded technical framework and living LABS), whose main topic is development and innovation of the building envelope, has allowed access to an innovative ecosystem and to test platforms in order to strategically process the results, which will be disseminated in a dynamic way through the “Innovation Ecosystem” platform.

The research phases are outlined in times, actions, criteria and tools aimed to investigate the effects of wind in an urban environment (with higher reference speeds than the limit set by the N.T.C. 2018), considering the definition of risk, technical repertoires and guidelines, both for design solutions and for integrated intervention plans. The above has been defined to conceive effective mitigation strategies,

identifying the building elements to be reinforced to avoid their failure under extreme winds (“source” buildings), classifying the effects of potential impacts of flying debris on the envelope of “target” buildings, and defining new protocols for assessing the resilience of the building envelope.

The identification of building elements that are most frequently damaged is essential to assess the reason of failure under extreme wind phenomena. These components are context-specific and may differ from others that fail in other geographic areas (Fig. 3). The technical and technological understanding of the building envelope is, therefore, crucial to assess the failure behaviour of selected building components under the action of the wind. The identification of building elements that are most frequently damaged, the sources of potential flying debris,

Equipment	Description	Type of test/activity/procedure	Related standards/norms
	<p>Envelope Test Chamber It is a "test chamber", made according to the operating characteristics established by the tests to be carried out. It is made up of an AAV (pressure-depression) system, a metal structure, the infill in sandwich panels in polyurethane foam, a thermal chamber, seismic beams, and furniture. The steel frame structure has a size of 18 (15 effective) x 12 x 2.50 m, where 1:1 scale mock-ups of curtain walls (according to UNI definition), windows (or similar elements) are installed</p>	<p>Equipped with 50 lasers for the measurement of frontal deflections during the wind load resistance tests and with a sprinkler system which aims to generate a uniform water film on the surface of the specimen with sprays of different intensities, according to the flow rates required by UNI and ASTM regulations, and for variable durations</p> <ul style="list-style-type: none"> • AAMA / ASTM fan (~> 180 km/h) • UNI fan (~ 60 km/h) • Pressure Fan (+ and -) 6000 Pa • Windborne Debris 	<p>According to the American standard</p> <ul style="list-style-type: none"> • AAMA 501.1- 05 • AAMA 501.4 - 00 • AAMA 501.5-07. • AAMA 501.6 - • ASTM 283.04-12 • ASTM 330.02-10 • ASTM 331.00 -09 • ASTM 1196 <p>And European standard</p> <ul style="list-style-type: none"> • UNI EN 12152 • UNI EN 12155 • UNI EN 12179 • UNI EN 13116 • UNI EN 12207
	<p>Dynamic Axial Fan Produces a normal flow of air to the sample at a minimum speed above 30 m/s (over 70 mile/h) along the horizontal centre axis for carrying out water and air tightness tests under dynamic conditions</p>	<p><i>"Curtain Walling–Watertightness–Laboratory Test under dynamic condition of air pressure and water spray"</i></p>	<p>According to the European standard EN 13050:2011</p>
	<p>Wind Speed Fan Capable of generating wind speeds of 180 ~ 200 km/h</p>	<p><i>"Standard Test Method for Water Penetration of Windows, Curtain Walls and Doors Using Dynamic Pressure"</i> The test consists in positioning a wind generator, such as a propeller, in front of the facade, while simultaneously splashing water on the surface of the test element Provide a pressure differential of 10 psf (480 Pa), these conditions are maintained for 15 minutes with 3,4 l/min m² (5 US gallons per ft² h). Allowable: no water allowed</p>	<p>According to the AAMA 501.1-05</p>
	<p>Sprinkler Grid or Water Permeability Tests It is electronically controlled for frontal positioning with respect to the test sample. The system consists of a series of steel tubes with full cone nozzles to create a square mesh 700 mm. The tubes are connected to each other by flexible hoses and are provided with an independent flow regulation system for each nozzle row</p>	<p><i>"Standard Test Method for Water Penetration of Windows, Curtain Walls and Doors Using Dynamic Pressure"</i> The sample will be tested at pressure of 10,02 psf (480 pascal) for 15 minutes. The quantity of water will be 3,4 l/min m², (5 US gallon x ft² h). The water will be sprayed according to ASTM E-331 by a watering device with a square grid of 700mm with nozzles placed on the vertical plan parallel to the mock-up plan. Requirement of eligibility: if water leaks develop, water on any horizontal mullion or sill shall not create a puddle larger than 2 square inches</p>	<p>Sprinkler Grid: Testing in according to the AAMA 501.1-05 ASTM 331.00-09</p>
	<p>Fans capable of achieving pressure of +/- 6000 Pa</p>	<p><i>Fans pressure of +/- 6000 Pa, for standard testing</i> The purpose of the test is to verify the resistance of the exterior component of a building against statically simulated wind load The specimen is placed plugging a chamber inside which an instrumentally adjustable positive or negative is produced. The system also includes displacement translators to verify the deformations of the specimen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • UNI EN 12152 • UNI EN 12179 • UNI EN 13116 • UNI EN 12207 • ASTM E 283 04 2012 • ASTM E 330 02 2010
 	<p>a) LARGE MISSILE consisting of a wooden beam with a length of 2.1 m section 51 x 102 mm and a weight of 4.1 kg, thrown at a speed of up to 88 km/h b) SMALL MISSILE consisting of 2 g steel pellets with a diameter of 7.9 mm, shot at a velocity of 144 km/h</p>	<p><i>"Impact test procedures"</i> The purpose of the test is to check the resistance of a building's exterior component to debris thrown at it during a hurricane. Through an air cannon, the specimen is subjected to high-speed impacts with two types of impacting bodies: large missile and small missile</p>	<ul style="list-style-type: none"> • TAS 201-94 • TAS 203

metodologico e orientare nuovi standard di valutazione, linee guida di progettazione e normative di riferimento. Ciò avrà un impatto positivo su industrie del settore, pubbliche amministrazioni, enti di gestione edilizia, al fine di migliorare la resilienza dell'habitat urbano, dove i nuovi edifici e i progetti di retrofit che coinvolgono l'involucro edilizio dovranno resistere a eventi meteorologici estremi.

La resistenza all'urto dei detriti volanti è un requisito obbligatorio per gli involucri edilizi in molte aree già da tempo interessate da questo problema. Uno dei risultati e possibili sviluppi futuri della ricerca è quello di creare un quadro per tale offerta anche in Italia (e in Europa), ove necessario. In previsione dell'incremento di intensità e frequenza degli eventi di vento estremo, la resistenza ai *flying debris* potrà diventare un requisito obbligatorio almeno per alcuni edifici (ad esempio quelli che dovrebbero mantenere la loro funzionalità in uno scenario post-evento).

Lo studio delle modalità di cedimento degli elementi costruttivi sotto forti venti sarà trasferito alle industrie interessate per attuare strategie di progettazione al fine di migliorare la resistenza dei loro prodotti, compreso lo sviluppo di nuovi sistemi di fissaggio e vincolo in grado di resistere alle sollecitazioni estreme. La progettazione dell'apparato di prova e la definizione di un protocollo di prova e valutazione per la resilienza dell'involucro edilizio aumenteranno la capacità dei laboratori coinvolti nel collaudo dell'involucro edilizio di fornire studi di qualità sulle prestazioni degli elementi dell'involucro edilizio. Ciò avrà un impatto positivo anche sulle industrie associate che svilupperanno prodotti più avanzati con un maggiore livello di specifiche per resistere al vento e migliorare la resilienza dell'ambiente costruito.

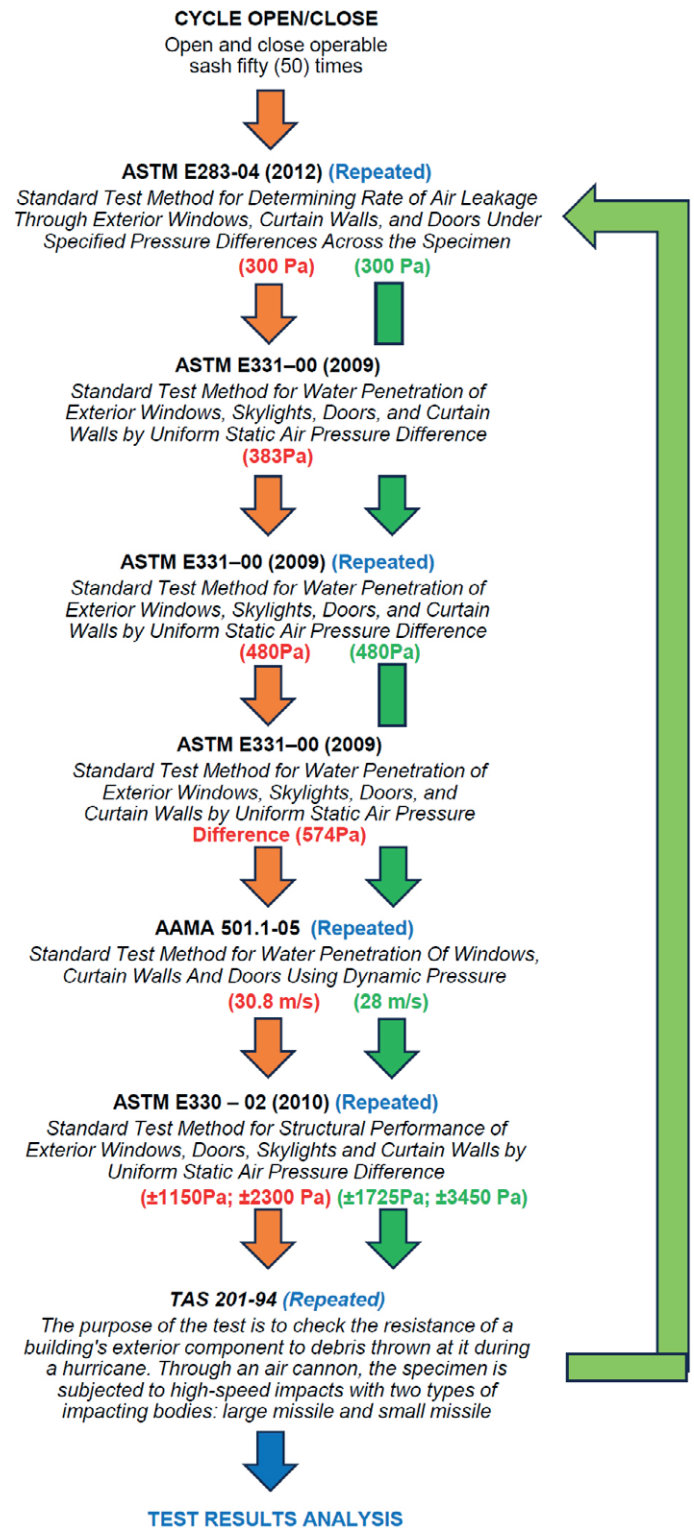
and the weather events that caused the damage are the first outcome of the study designed to understand the specific damages and their construction-related causes. These results are translated into a set of technical documents that support specific industries in adapting their products for the prevention of flying debris.

Qualified support to the entire research project comes from the contribution of climatological consultancy, given by various universities and innovative companies that are partners of the Horizon research project "METABUILDING LABS", which covers some specific aspects in the field of building envelopes and the built environment in general.

The testing procedure and apparatus necessary to conduct the tests differ from those available internationally because they aim to be based on

specific flying debris types, identified through the assessment of the phenomenon in the Italian context. The objective of the tests (Fig. 4) is to calibrate and fine-tune the testing apparatus, and to identify glass types that meet the minimum impact resistance to flying debris. The purpose is to identify the design characteristics of a façade resistant to flying debris impact, which will be subsequently built and tested with the aim of verifying the results of the design method and of understanding the optimal testing procedure.

The test protocol resulting from the research (whose procedure is illustrated in Fig. 5) aims to analyse the behaviour of transparent façade components by providing a series of tests aimed at determining the permeability to air or water, characterising structural performance, impact resistance capabilities,



resistance to strong and continuous wind cycles, and resistance to flying debris during an extreme event to achieve the objective of improving the resilience of the built environment to extreme wind phenomena.

The construction of thematic matrices that relate urban contexts to phenomena related to climate change aims at creating a set of indicators to evalu-

ate and mitigate the consequences of such events. The application processes involve the development of new test protocols and the definition of new test apparatus capable of simulating the changed stress and strain conditions of the building envelope, for the innovation of future experimental activities, for the transfer of knowledge acquired, and for the advancement of

REFERENCES

ASTM (2017), *Specifiche standard per le prestazioni di finestre esterne, facciate continue, porte e persiane anti-tempesta colpite da detriti portati dal vento negli uragani*, ASTM E1996-17, ASTM, West Conshohocken, Pa, USA.

ASTM (2019), *Metodo di prova standard per le prestazioni di finestre esterne, facciate continue, porte e sistemi di protezione dagli urti colpiti da missili ed esposti a differenziali di pressione ciclici*, ASTM E1886-19, ASTM, West Conshohocken, Pa, USA.

Buildings and Climate Change Adaptation (2021), *Report A call for action. Global Alliance for Buildings and Construction*. Available at:

<https://globalabc.org/sites/default/files/2021-02/Buildings%20and%20Climate%20Change%20Adaptation%20-%20FULL.pdf> (Accessed on 14/07/2023).

Butler, K. and Kareem, A. (2012), "Anatomy of Glass Damage in Urban Areas during Hurricanes. In Advances", in *Hurricane Engineering: Learning from Our Past*, pp. 405-416).

De La Guardia, R. (2021), "Hazard Mitigation of the Building Envelope: Are Our Building Envelopes Ready for a Powerful Storm?", in *Advances in Hurricane Engineering: Learning from Our Past*, pp. 381-392.

Henderson, D., Smith, D., Boughton, G. and Ginger, J. (2018), *Damage and loss to Australian engineered buildings during recent cyclones*. International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation Tohoku University, Sendai, Japan. March 11-14, 2018.

Herseth, A., Smith, T. L. and Overcash, G. (2012), "FEMA's Coastal Construction Manual Update—Wind Resistant Design", in *Advances in Hurricane Engineering: Learning from Our Past*, pp. 119-127.

Holmes, J.D., (2015), *Wind Loading of Structures*. CRC Press, Taylor & Francis Group.

IPCC (2023), *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*, Intergovernmental Panel on Climate Change. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> (Accessed on 02/08/2023).

the European and national regulatory framework. Since the research is still ongoing, the results are to be considered intermediate.

Conclusions and future development

The research presented introduces for the first time in the European context and in the Italian building practice the concept of "flying debris impact resistance" of the building envelope. The study is conducted to promote a new approach in order to implement a new methodological apparatus and to set new evaluation standards, design guidelines and reference regulations. The research results will have a positive impact on construction industries, public administrations and building management bodies in order to improve the resilience of the built environment, where new buildings and retrofit projects involving the building

envelope will have to withstand the effects of extreme weather events.

Flying debris impact-resistance is a mandatory requirement for building envelopes in many areas affected by the problem. The objective of this research is to create the framework for such a solution also in Italy (and Europe), where needed. Considering the increase in intensity and frequency of extreme wind events, flying debris resistance can become a mandatory requirement for buildings (especially those which should maintain their functional features in a post-event scenario).

The study of the failure of building elements under severe winds will be transferred to the relevant industries to implement design strategies that improve the resistance of their products to extreme winds, including the study of new retention mechanisms capable

of withstanding extreme stresses. Laboy, S., Smith, D., Fernandez, G., Masters, F. and Gurley, K. (2012), "Residential fenestration vulnerability to windborne debris", in *Advances in Hurricane Engineering: Learning from Our Past*, pp. 328-336.

Lin, N., Letchford, C. and Holmes, J. (2006), "Investigation of plate-type windborne debris", *JWEIS* Vol. 94, pp. 51-76.

Miami Dade County (2006), *Post Hurricane Wilma assessment*. Available at: <https://www.miamidade.gov/building/library/reports/wilma-assessment.pdf> (Accessed on 09/11/2023).

Pastori, S. and Mazzucchelli E.S., (2023), *Climate Change and Extreme Wind Events: Overview and Perspectives for a Resilient Built Environment*. Urban Transition – Perspectives on Urban Systems and Environments. IntechOpen. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.111828> (Accessed on 30/11/2023).

RINGRAZIAMENTI

La ricerca "METABUILDING LABS" (METAclustered, SME-oriented European Open Innovation Test Bed for the BUILDING envelope materials industrial sector using a harmonised and upgraded technical framework and living LABS) coordinata dalla capofila la NOBATEK/INEF4 (FR) con 37 partner internazionali è stata finanziata all'interno del Bando HORIZON 2020-NMBP-TO-IND-2018-2020 (FOUNDATIONS FOR TOMORROW'S INDUSTRY).

of withstanding extreme stresses.

The design of the testing apparatus and the definition of the testing procedure will increase the capacity of the laboratories involved in testing the building envelope to deliver quality studies on the performance of building envelope elements. This aspect will positively impact the associated industries, which will develop more advanced products with an increased level of specification to resist wind and improve the resiliency of the built environment.

ACKNOWLEDGMENTS

The "METABUILDING LABS" research (METAclustered, SME-oriented European Open Innovation Test Bed for the BUILDING envelope materials industrial sector using a harmonised and upgraded technical framework and living LABS) coordinated by

the lead partner NOBATEK/INEF4 (FR) with 37 international partners was funded within the HORIZON 2020-NMBP-TO-IND-2018-2020 (FOUNDATIONS FOR TOMORROW'S INDUSTRY) call.