

New assessment protocols to improve the building envelope resilience

Milardi Martino¹ <https://orcid.org/0000-0001-5040-2778>

Mandaglio Mariateresa¹ <https://orcid.org/0009-0005-6399-2582>

Mazzucchelli Enrico Sergio² <https://orcid.org/0000-0001-7722-6700>

Rigone Paolo² <https://orcid.org/0000-0002-3416-8747>

Giussani Paolo² <https://orcid.org/0009-0008-0559-3948>

¹ Department of Architecture, Università Mediterranea di Reggio Calabria, Italy

² Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering, Politecnico di Milano, Italy

Primary contact: Milardi Martino, mmilardi@unirc.it

This article has been accepted for publication and undergone full peer review but has not been through the copyediting, typesetting, pagination and proofreading process, which may lead to differences between this version and the Version of Record.

Published: November 22, 2023
10.36253/techne-15116

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 for reducing 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

Please cite this article as: Milardi, M., Mandaglio, M., Mazzucchelli, E. S., Rigione, P., Giussani, P. (2023). New assessment protocols to improve the building envelope resilience. *Techne. Journal of Technology for Architecture and Environment*, Just Accepted.

Introduction

In the last years climate change issues have become increasingly relevant, bringing a greater awareness of the impacts that 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 UNFCCC (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 represents an emblematic example of the intellectual and operational challenge related to complex systems, and mathematical models represent 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 envelopes requirements, as well as new users' comfort expectations, are no 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 logics in relation to increasingly frequent extreme weather events.

During events characterised by extreme winds, one of the major risks is linked to the detachment of components and parts of buildings and other street furniture: tiles, façade elements, antennas, etc. These elements can be transported by the wind, becoming flying debris which represents a serious threat to 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 in order to avoid breakages in the envelope, with consequent increase in positive and negative pressures and damage due to water infiltration into indoor environments. Currently, in national and European codes, the resilience performance of the building envelope against flying debris is not yet included. 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 on the one hand and, above all, to mitigate the phenomena deriving from the dynamics of the built environment that can trigger climate change at small and large scale.

State of the art

Evidence of climate change is now clear in many areas. In the last decade an increase in both the frequency and maximum wind 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: tiles, facade elements, antennas, etc. they can be dragged by the wind, becoming flying debris capable of causing damage to people and property (ASCE, 2014; Butler et al., 2012).

Recent extreme wind events in Italy (Fig. 01) and Europe demonstrate that existing buildings have many vulnerable elements. The combination of stronger wind action, the old building stock and meteorological events with characteristics different from the past (consider for example the frequent "downburst" events) are the main reasons for wind-induced damage and this is the field where further research is required.

Governing bodies in areas that are prone to extreme weather events (ie: Florida, Honk Kong, Japan, Australia) implemented several measures to mitigate the effect of wind on the built environment, with a special care 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 human safety (FEMA, 1993; CTS, 2017). Such measures have one single goal: preventing the damages to people and properties due to flying debris. Such objective is sought by adopting two sets of measures: on the one side, reducing the likelihood of the flying debris phenomenon, by improving the resistance of man-made elements to wind; on the other side, mitigating the

consequences of flying debris, by setting design guidelines and testing methodologies to ensure the resistance of the building envelope to the impact of flying debris.

It is urgent to understand the evolving scenario of wind events in Italy both in terms of wind characteristics and intensity. This scenario needs to be linked with an in-depth study on the Italian built environment (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 elements (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 the 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 the framework of a curtain wall. Subsequently, limited to US standards, a cyclic facade pressure test is required, depending on the location of the building. In general, standards are based on evidence from practical experience (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), proposing solutions to reduce 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 test facilities that enable them to develop and test innovative envelope solutions for next-generation buildings.

The project core research methodology consists in the analysis of existing data and literature, in the design of new testing apparatus and testing procedures through experimental studies and laboratorial activity. The deductive approach is necessary to perform the analysis of strong wind phenomena not only related to the "source" buildings (Fig. 02) but considering also those of effect related to "target" buildings.

A new series of simulations, surveys, elaborations, and evaluations will concern the "wind element" 's phenomenological complexity, addressed to the study of extreme wind in the urban environment, with particular attention to the definition on the one hand of the magnitude of the hazard, on the other hand 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, and in particular 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 that are developed, through a strategic methodological approach, concern the definition of a series of systematised information which has the dual role of

serving, on the one hand, the restitution of dynamic data referring to specific contexts, on the other to participate 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 last four decades, the flight of various types of debris has been analysed taking in consideration the characteristics of the object and the wind speed. Three geometric characteristics of the debris were analysed: compact objects, flat objects and rods. Therefore, the potential failure wind speed of various objects in the urban environment was investigated (Holmes 2015).

Considering the main objectives of the research, the construction of thematic matrices, which relate urban settings with the 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, through which to apply simulations of the wind effect. In this light, 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 be able to implement a new methodological approach and guide new standards and assessments criteria.

The innovation of the research is significant in the development of new standards for flying debris impact resilience of building envelopes in case of extreme climatic events, to be introduced in the Italian standardisation regulation framework, in the testing phase of building envelopes through innovative test equipment in order to evaluate the resistance performance to the impact of flying debris.

The methodology is supported by experimental feedback through actions on different periodicity and intensity, referring to direct and indirect audience. The results of the research are shared following a dynamic approach through the platform "Innovation Ecosystem". This aspect ensures a 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 program 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 to occur;
- 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 the definition of the testing methodology;
- proposal of changes to codes 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, the 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), which has as main topic the development and the innovation of the building envelope, has allowed access to an innovative ecosystem and to test platforms in order to have a strategic processing of 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 reference speeds higher compared to 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. All this in order to identify 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 the building elements that are more frequently damaged is fundamental 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. 03). The technical and technological understanding of the building envelope is therefore fundamental for the assessment of the failure behaviour of selected building components under the action of the wind.

The identification of the building elements that are more frequently damaged, the sources of potential flying debris and the weather events that caused the damage is the first result of the study, aimed to understand the specific damages, and their constructive causes. These results are translated in a set of technical documents that support specific industries to adapt their products for the prevention of flying debris.

A qualified support to the entire research project comes from the contribution of climatological consultancy, given by different 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 is to calibrate and fine-tune the testing apparatus and to identify glasses that meet the minimum impact resistance to flying debris. This is in order 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 understanding the optimal testing procedure.

The overall result of this project is the identification of a suitable testing procedure (Fig. 04), which uses the impact design inputs achieved through meteorological, aerodynamics, and building technology considerations to reach the objective of improving the resiliency of the built environment to extreme wind phenomena.

The construction of thematic matrices that relate urban contexts to phenomena related to climate change has the aim of creating a set of indicators to evaluate 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, both for the innovation of future experimental activities and for the transfer of knowledge acquired and the advancement of the European and national regulatory framework. Since the research is still ongoing, the results are to be considered intermediate.

Conclusions and future development

The presented research introduces for the first time in the European context and in the Italian building practise 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, 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 extreme weather events effects.

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 provision 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 that should maintain their functionality 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 to improve the resistance of their products to extreme winds, including the study of new retain mechanisms able to withstand 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 of the building envelope to deliver quality studies on the performances of the building envelope elements. This aspect will positively impact the associated industries that 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.

References

- 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).
- ASTM (2017), Standard Specification for Performance of Exterior Windows, Curtain Walls, Doors and Storm Shutters Impacted by Windborne Debris in Hurricanes, ASTM E1996-17, ASTM, West Conshohocken, Pa, USA
- ASTM (2019), Standard Test Method for Performance of Exterior Windows, etc. impacted by Missile(s) and Exposed to Cyclic Pressure Differentials, 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., Kareem, A., (2012), Anatomy of Glass Damage in Urban Areas during Hurricanes. In: Advances in Hurricane Engineering: Learning from Our Past. ASCE
- Laboy, S., et al., (2012), Residential Fenestration Vulnerability to Windborne Debris. In: Advances in Hurricane Engineering: Learning from Our Past. ASCE, 2012
- Henderson, D., et al., (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
- Herse, A., et al., (2012), FEMA's Coastal Construction Manual Update Wind Resistant Design. In: Advances in Hurricane Engineering. Learning from Our Past.
- Holmes, J.D., (2015), Wind Loading of Structures. CRC Press, Taylor & Francis Group
- De La Guardia, R., (2012), Hazard Mitigation of the Building Envelope, In: Advances in Hurricane Eng. ASCE
- Lin, N., et al., (2006), Investigation of plate-type windborne debris. JWEIS 94, 51-76

Images and captions



Fig. 01 - Images of the whirlwind of July 24, 2023, Seregno (MB)

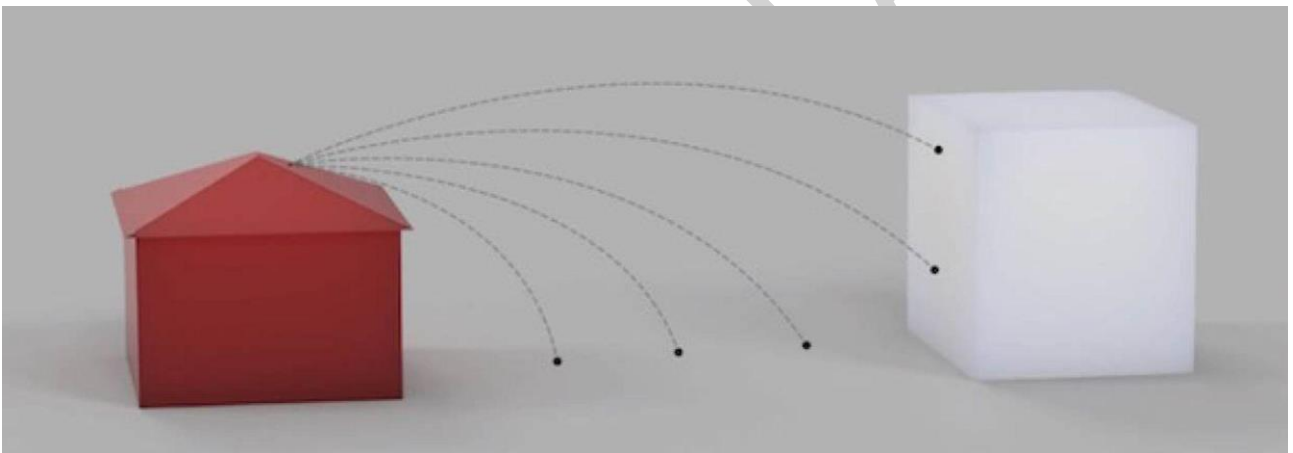


Fig. 02 - "Source" building and "target" building

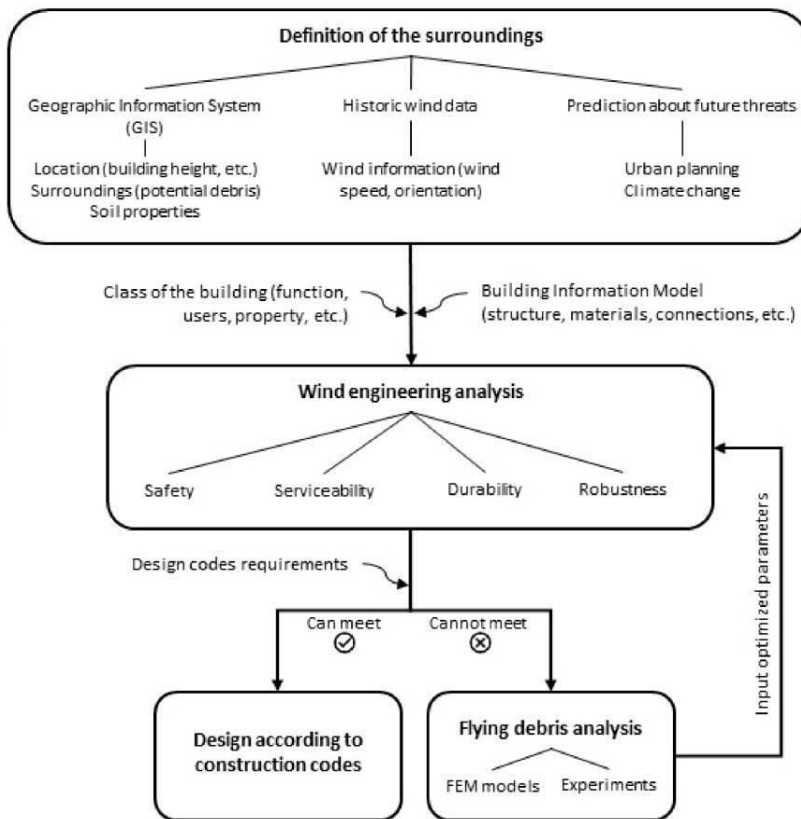


Fig. 03 - Example of the analysis process for the design of resilient envelopes

Example tests:	Normative references:
Opening/Closing	ASTM E283-04 (2012)
Preload	ASTM E330-02 (2010)
Air infiltration	ASTM E283-04 (2012)
Static Pressure Water Resistance	ASTM E331-00 (2009)
Dynamic Pressure Water Resistance	AAMA 501.1-05-00 (2007)
Resistance to wind load – test performed under design load conditions (serviceability)	ASTM E330 – 02 (2010)
Repetition Air infiltration	ASTM E283-04 (2012)
Repetition Static Pressure Water Resistance	ASTM E331-00 (2009)
Resistance to wind load – increased wind resistance test (safety conditions)	ASTM E330 – 02 (2010)

Fig. 04 - Test procedure example

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

Milardi Martino¹ <https://orcid.org/0000-0001-5040-2778>

Mandaglio Mariateresa¹ <https://orcid.org/0009-0005-6399-2582>

Mazzucchelli Enrico Sergio² <https://orcid.org/0000-0001-7722-6700>

Rigone Paolo² <https://orcid.org/0000-0002-3416-8747>

Giussani Paolo² <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

Primary contact: Milardi Martino, mmilardi@unirc.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.

Al contempo, l'UNFCCC (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 e altri arredi urbani: tegole, elementi di facciata, antenne, ecc. 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 nell'involucro, con conseguente incremento delle pressioni positive e negative ed 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 cambiamenti climatici alla piccola e alla grande scala.

Stato dell'arte

La prova del cambiamento climatico è ormai chiara 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, ecc. 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. 01) e in Europa dimostrano che gli edifici esistenti presentano molti elementi vulnerabili. 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 edificato. Sono stati condotti studi e osservazioni sulle conseguenze sull'ambiente edificato e sulla 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 urgente comprendere lo scenario in evoluzione degli eventi eolici in Italia sia in termini di caratteristiche del vento, che di intensità. Ciò deve essere collegato con uno studio approfondito sull'ambiente costruito italiano (rappresentativo dei paesi europei che si affacciano sul Mar Mediterraneo) per evidenziare il potenziale rischio di detriti volanti e la sua soluzione. Per quanto riguarda i detriti volanti, sono stati condotti diversi studi incentrati sull'inizio del volo e sulla traiettoria, ma la loro estensione ai differenti componenti edilizi è difficile, perché tutte le caratteristiche dell'oggetto (es. forma, massa per unità di area, etc.) hanno un ruolo chiave nella definizione della

sua traiettoria di volo. Oltre alla traiettoria dei flying debris, è stata studiata la potenziale velocità del vento in grado di danneggiare diversi 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 (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 differente, 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 del progetto 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. 02), ma anche per gli effetti subiti e indotti sugli edifici "bersaglio" (target).

Una nuova 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'altra allo scopo di repertori tecnici e linee guida sia per soluzioni progettuali che per piani di intervento.

Lo scopo è sviluppare 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, consentono di valutare e quindi certificare, non solo le caratteristiche prestazionali degli involucri edilizi, ma faciliteranno lo sviluppo di prassi sperimentali, favorendo la definizione di nuove configurazioni 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, dall'altro di partecipare all'intero bagaglio di azioni/strumentazioni utili all'avanzamento delle conoscenze nel campo delle strategie per la lotta al cambiamento climatico.

Negli ultimi quattro decenni è stato analizzato il 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 di "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 (sinottico e non sinottico). In questa luce, 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 Testing per gli 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 mettere 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 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 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. 03). 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 supportano 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 edilizi 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 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 risultato complessivo del progetto di ricerca è l'identificazione di una procedura di test adeguata (Fig. 04), che utilizza gli input di progettazione dell'impatto ottenuti attraverso considerazioni meteorologiche, aerodinamiche e di tecnologia costruttiva 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 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 dal 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.

Acknowledgments

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).

Bibliografia

- 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).
- 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., Kareem, A., (2012), Anatomy of Glass Damage in Urban Areas during Hurricanes. In: Advances in Hurricane Engineering: Learning from Our Past. ASCE
- Laboy, S., et al., (2012), Residential Fenestration Vulnerability to Windborne Debris. In: Advances in Hurricane Engineering: Learning from Our Past. ASCE, 2012
- Henderson, D., et al., (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., et al., (2012), FEMA's Coastal Construction Manual Update Wind Resistant Design. In: Advances in Hurricane Engineering. Learning from Our Past.
- Holmes, J.D., (2015), Wind Loading of Structures. CRC Press, Taylor & Francis Group
- De La Guardia, R., (2012), Hazard Mitigation of the Building Envelope, In: Advances in Hurricane Eng. ASCE
- Lin, N., et al., (2006), Investigation of plate-type windborne debris. JWEIS 94, 51-76