

Angela Mejorin, William Douglas Miranda, Dario Trabucco,  
Università Iuav di Venezia, Council on Tall Buildings and Urban Habitat

amejorin@ctbuh.org – amejorin@iuav.it  
wmiranda@ctbuh.org – wmiranda@iuav.it  
dtrabucco@ctbuh.org – dtrabucco@iuav.it

**Abstract.** Il paper presenta gli esiti di una ricerca bibliografica condotta su documenti a carattere normativo adottati nel panorama internazionale per la definizione, realizzazione e test di facciate resistenti agli uragani e ai tornado. Sono così chiamate le facciate costruite con tecnologie che permettono il superamento di test al fine di verificare la resistenza sia del frame che della superficie vetrata agli impatti causati da oggetti sollevati dal vento durante gli questi fenomeni meteorologici eccezionali. Lo scopo della ricerca è quello di individuare le migliori pratiche adottate per aumentare la resilienza dell'involucro degli edifici a questi fenomeni, valutando una eventuale applicabilità di alcuni dei principi adottati anche alle esigenze specifiche del mercato europeo e italiano.

**Parole chiave:** facciate, curtain wall, resistenza all'impatto, wind-borne debris, cambiamenti climatici.

## Inquadramento del problema

I cambiamenti climatici in atto stanno modificando e ampliando il *range* dei fenomeni meteorologici che è possibile riscontrare in un dato luogo. L'effetto serra provocato dalla concentrazione in atmosfera di CO<sub>2</sub> e altri gas sta producendo un aumento tangibile delle temperature medie globali riscontrabile sia dall'analisi di dati strumentali rilevati a scala globale, sia dall'osservazione di innumerevoli "indicatori" puntuali. L'aumento della temperatura atmosferica equivale a un aumento dell'energia disponibile e, di conseguenza, ad una estremizzazione dei fenomeni atmosferici.

In questo contesto di estremizzazione climatica, non ci si deve stupire se anche in Italia, e più in generale in Europa, si iniziano a verificare fenomeni atmosferici inusuali e fino a qualche decennio fa quasi sconosciuti alle nostre latitudini.

La stagione 2017 degli uragani atlantici è stata quella che ha prodotto i danni economici maggiori sulle attività umane causando devastazioni per oltre 350 miliardi di dollari. Il dato più preoccupante dal punto di vista Europeo è però rappresentato dal fatto che nel 2017 l'Uragano Ophelia, che ha raggiunto categoria 3 nella scala Saffir-Simpson, è stato il ciclone sviluppatosi più a nord da quando questi fenomeni vengono monitorati in modo sistematico. Tale uragano – per fortuna depotenziato a tempesta extra-tropicale - ha poi impattato sull'Irlanda e l'Inghilterra con venti a oltre 190 km/h (Siggins, 2017). Altre tempeste di vento si sono verificate nel corso del 2017 in Europa e gli annali meteorologici riportano sempre più spesso fenomeni molto intensi specialmente nei territori che si affacciano sul Mare del Nord. In Italia, nel 2016 si è registrata la raffica di vento più forte di sempre – 238 km/h (Ansa, 2016). Il 2015 e il 2016 hanno visto numerose trombe d'aria nella Pianura Padana raggiungere raffiche di vento e provocando danni paragonabili a quelli dei tornado frequenti nelle pianure del Midwest degli Stati Uniti.

## Exceptional atmospheric events resilience of the curtain wall

I cambiamenti climatici in atto stanno modificando e ampliando il *range* dei fenomeni meteorologici che è possibile riscontrare in un dato luogo. L'effetto serra provocato dalla concentrazione in atmosfera di CO<sub>2</sub> e altri gas sta producendo un aumento tangibile delle temperature medie globali riscontrabile sia dall'analisi di dati strumentali rilevati a scala globale, sia dall'osservazione di innumerevoli "indicatori" puntuali. L'aumento della temperatura atmosferica equivale a un aumento dell'energia disponibile e, di conseguenza, ad una estremizzazione dei fenomeni atmosferici.

In questo contesto di estremizzazione climatica, non ci si deve stupire se anche in Italia, e più in generale in Europa, si iniziano a verificare fenomeni atmosferici inusuali e fino a qualche decennio fa quasi sconosciuti alle nostre latitudini.

La stagione 2017 degli uragani atlantici è stata quella che ha prodotto i danni economici maggiori sulle attività umane causando devastazioni per oltre 350 miliardi di dollari. Il dato più preoccupante dal punto di vista Europeo è però rappresentato dal fatto che nel 2017 l'Uragano Ophelia, che ha raggiunto categoria 3 nella scala Saffir-Simpson, è stato il ciclone sviluppatosi più a nord da quando questi fenomeni vengono monitorati in modo sistematico. Tale uragano – per fortuna depotenziato a tempesta extra-tropicale - ha poi impattato sull'Irlanda e l'Inghilterra con venti a oltre 190 km/h (Siggins, 2017). Altre tempeste di vento si sono verificate nel corso del 2017 in Europa e gli annali meteorologici riportano sempre più spesso fenomeni molto intensi specialmente nei territori che si affacciano sul Mare del Nord. In Italia, nel 2016 si è registrata la raffica di vento più forte di sempre – 238 km/h (Ansa, 2016). Il 2015 e il 2016 hanno visto numerose trombe d'aria nella Pianura Padana raggiungere raffiche di vento e provocando danni paragonabili a quelli dei tornado frequenti nelle pianure del Midwest degli Stati Uniti.

Come si possono realizzare edifici in grado di resistere a tali fenomeni? Che caratteristiche devono avere gli involucri costruiti su suolo Europeo e Italiano, e in particolare le superfici vetrate, per impedire danni potenzialmente irreparabili agli edifici e alle attività in essi svolte?

**Abstract.** The paper presents the results of a research conducted on codes and standards adopted internationally for the design, construction and testing of hurricane- and tornado-resistant façades. These façades are built using technologies that pass tests in order to verify the resistance of both the frame and the glazed surface to the impacts caused by wind-borne debris during these extreme meteorological events. The aim of the research is the identification of the best practices that have been adopted, in order to increase the resilience of building envelopes to this weather phenomenon, evaluating the possible applicability of adopting the principles to the specific needs of the European and Italian market.

**Keywords:** façades, curtain wall, impact resistance, wind-borne debris, climate changes.

Come si possono realizzare edifici in grado di resistere a tali fenomeni? Che caratteristiche devono avere gli involucri costruiti su suolo Europeo e Italiano, e in particolare le superfici vetrate, per impedire danni potenzialmente irreparabili agli edifici e alle attività in essi svolte?

La prima normativa che si è sviluppata per questi eventi meteorologici imprevedibili devastanti aveva l'obiettivo di aumentare la resilienza degli edifici ai cicloni tropicali. Nel 1974 il Ciclone Tracy – cicloni tropicali, uragani e tifoni sono tre nomi diversi per lo stesso fenomeno atmosferico, a seconda

## Il curtain wall resistente a fenomeni meteorologici ventosi devastanti

La prima normativa che si è sviluppata per questi eventi meteorologici imprevedibili devastanti aveva l'obiettivo di aumentare la resilienza degli edifici ai cicloni tropicali. Nel 1974 il Ciclone Tracy – cicloni tropicali, uragani e tifoni sono tre nomi diversi per lo stesso fenomeno atmosferico, a seconda

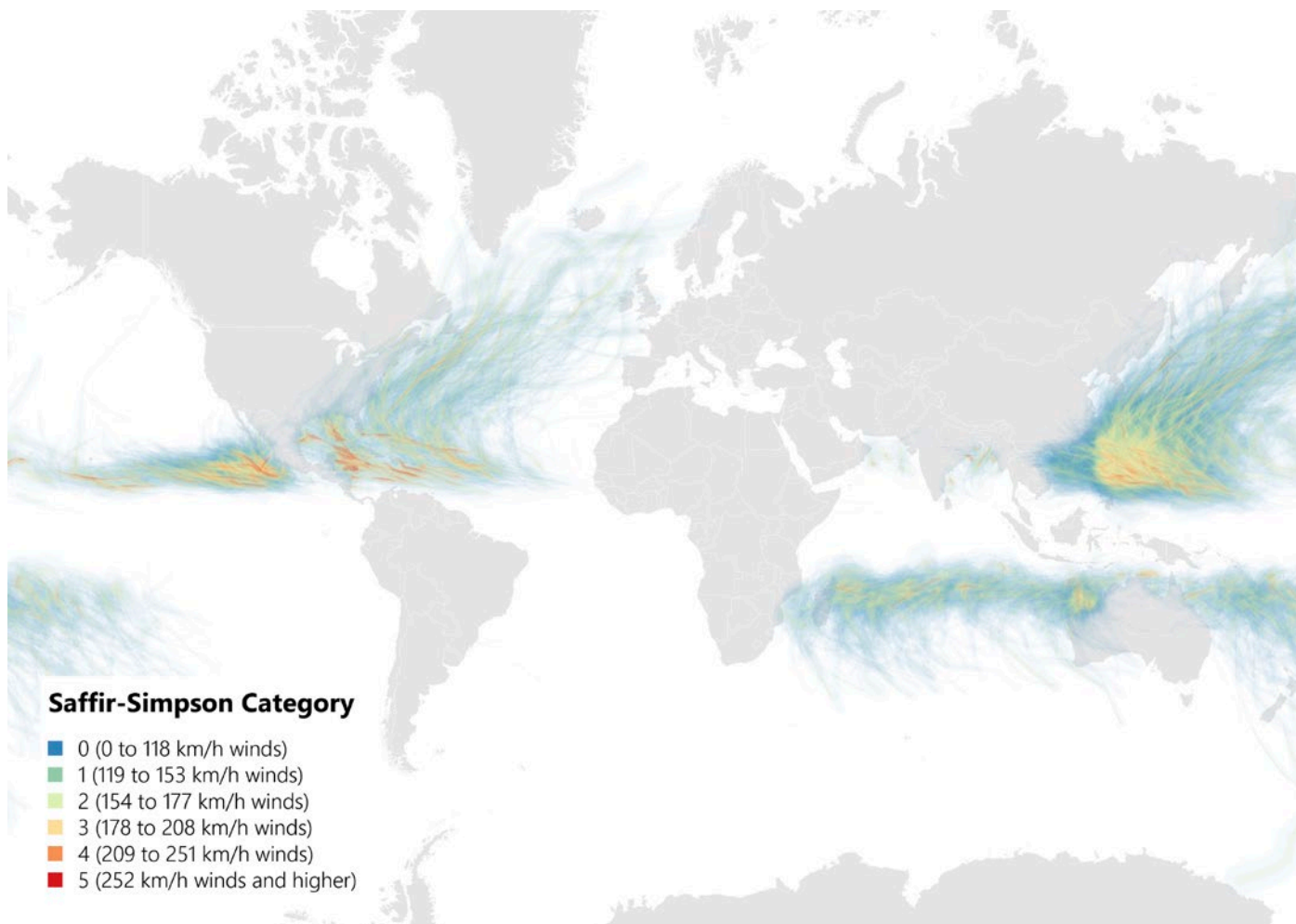
## Overview on the topic

Climate change is modifying and expanding the range that major weather events that can reach in a specific place. The greenhouse effect, caused by the concentration of CO<sub>2</sub> and other gases in the atmosphere, is producing a tangible increase in the global average temperatures. This comes from both from the analysis of instrumental data detected on a global scale, and from the observation of countless, specific "indicators". The increase in temperature resulting in a corresponding increase in energy and, as a result, this causes more extreme atmospheric events.

In this context of extreme climates, one cannot be surprised if, in Italy, and more generally in Europe, unusual atmospheric phenomena have begun to occur, which was almost unknown in these areas until a few decades ago. The 2017 season of Atlantic hurricanes

produced the greatest economic damage ever, causing devastation of over 350 billion dollars. Of these storms, the most worrying, from a European point of view, however, is the 2017 Hurricane Ophelia. This storm reached category 3 on the Saffir-Simpson scale and it was the furthest east hurricane registered since these events began to be systematically monitored.

This hurricane – fortunately weakened by an extratropical storm – impacted Ireland and England with winds at over 190 km/h (Siggins, 2017). Other windstorms occurred during 2017 in Europe and the annual weather-climate records are increasingly reporting very intense events, especially in the territories bordering the North Sea. In Italy, in 2016, the strongest gust of wind recorded was 238 km/h (Ansa, 2016). 2015 and 2016 saw numerous tornadoes in the Po Valley. They caused damage equivalent to



those of the frequent tornadoes that occur in the plains of the United States Midwest.

How can buildings be constructed in order to withstand these events? Which characteristic must the enclosure of European and Italian buildings have, and specifically the glazed surfaces, to prevent potentially irreparable damage to buildings and their activities?

**The curtain wall resistant to devastating wind events**

The first code which was developed for these devastating and unpredictable weather events had the goal of increasing the resilience of buildings to tropical cyclones. Tropical cyclones, hurricanes and typhoons are three different names for the same atmospheric phenomenon, depending on the geographical position in which they develop. In 1974, Cyclone Tracy hit the city of

Darwin, in Australia, with winds up to 240 km/h and caused major destruction. 65 people lost their lives and Australia began developing a set of guidelines for the design of cyclone-resistant buildings (Mejorin et al., 2018b).

In the Darwin Building Manual (Darwin Reconstruction Commission, 1975) the first tests to classify façades as “cyclones resistant” are presented. The façade had to withstand the impact of a 4 kg wooden missile, with 100x50 mm section, at a speed of 20 m/s, as a simulation of objects that can rise in very windy conditions and impact against windows. Moreover, in Australia, in 1978, the Technical Record 440 was published (Experimental Building Station of the Department of Construction, 1978), in which the impact velocity of the missile was dropped to 15 m/s. It is necessary to understand the performance of a building when it is hit

by strong winds, in order to recognize the reason that attention is dedicated to these building components. The air, when moving around a building, creates a pressure differential. There is a positive pressure zone (facing the wind) and a negative pressure zone (leeward façade). The interior of the building is a neutral area. If part envelope breaks on the side with positive pressure, the leeward façade becomes a membrane between two zones of positive and negative pressure causing this façade to potentially collapse. The integrity of the envelope is fundamental for the stability of buildings subjected to devastating winds, but these elements, and especially the glazing surfaces, are prone to the impact of flying debris.

Even if the stability of the envelope is not compromised, damage to a building’s glazing can cause significant economic damage:

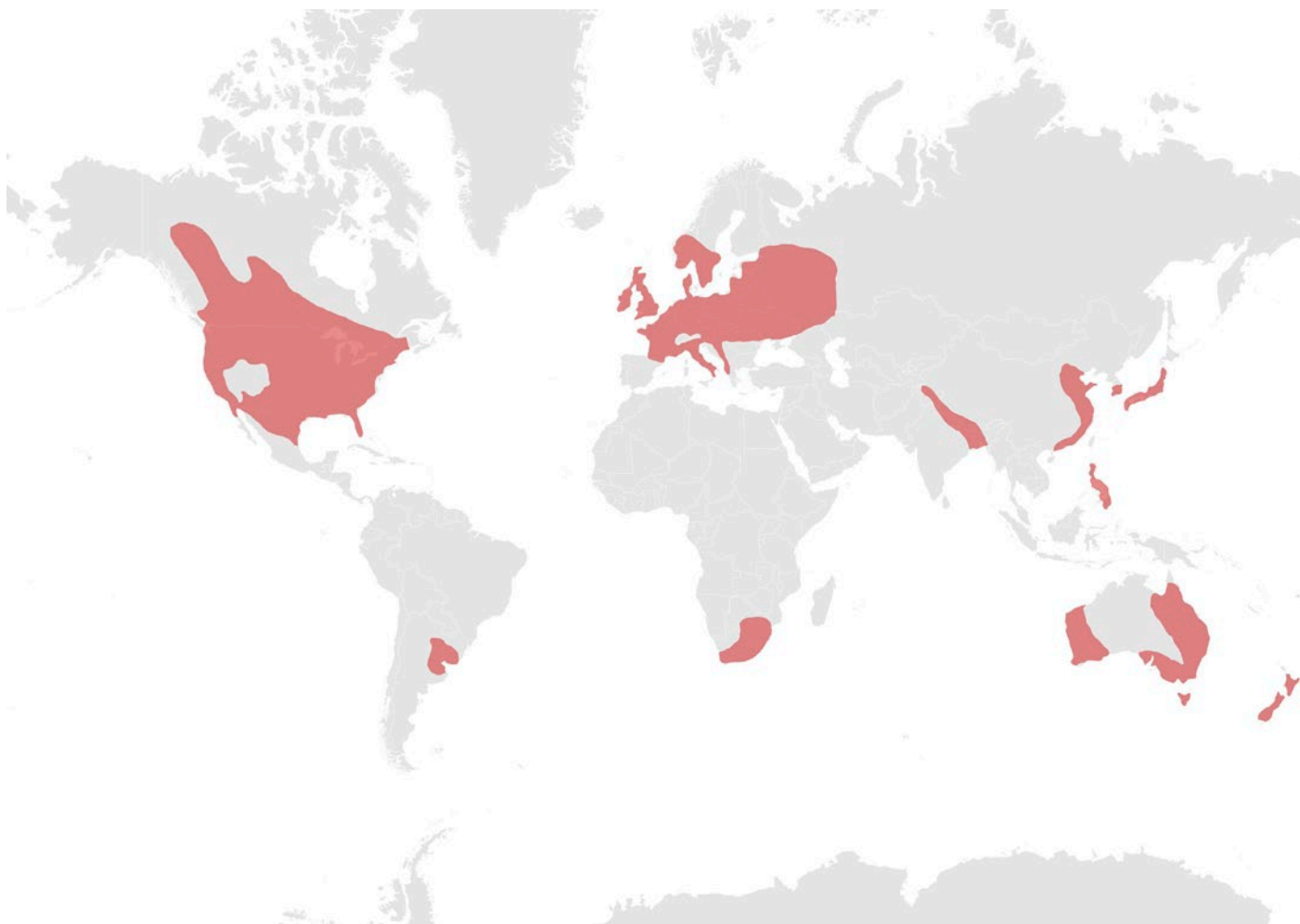
- cost for repairing the damaged building envelope;
- economic loss due to non-use of the rooms affected by the damage;
- damage caused by rainwater penetration.

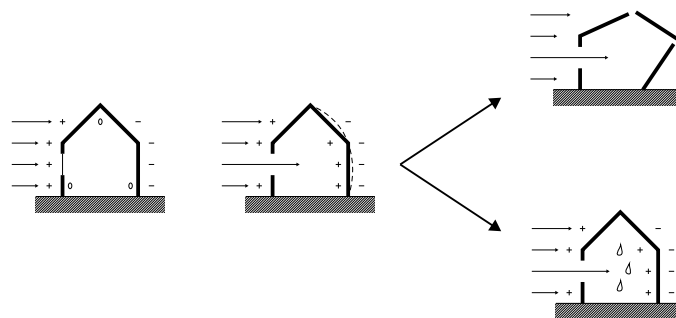
Façade resilience is guaranteed thanks to the development of: assembly techniques for the glass sheets and the metal frame; the lamination of the glass lites themselves. The lamination is the coupling of two or more glass sheets with an interlayer between them. The interlayer guarantees residual post-impact and post-breakage strength of the laminated glass. The most used interlayer is PVB (polyvinyl butyral), but new solutions like Ionoplast are 100 times stiffer and five times more resistant to tearing. These are the most suitable for making tornado-resistant facades (Block et al., 2015), which differ from cyclones as they have a more

dell'area geografica in cui si sviluppano – colpì la città di Darwin, in Australia, con venti fino a 240 km/h, distruggendola quasi completamente. Persero la vita 65 persone e l'Australia iniziò a sviluppare un insieme di linee guida per la progettazione di edifici resistenti ai cicloni (Mejorin et al., 2018b). Nel Darwin Building Manual (Darwin Reconstruction Commission, 1975) si trovano i primi test sviluppati per classificare le facciate come “resistenti ai cicloni”. La facciata doveva resistere all'impatto di un missile in legno di 4 kg, sezione di 100x50 mm e velocità di 20 m/s, come simulazione degli oggetti che possono alzarsi in condizioni fortemente ventose e stagliarsi contro i serramenti. Sempre in Australia, nel 1978, venne pubblicata la Technical Record 440 (Experimental Building Station of the Department of Construction, 1978), in cui la velocità di impatto del missile scende a 15 m/s. Per capire il motivo dell'attenzione dedicata a queste componenti è necessario comprendere il comportamento di un edificio quan-

do viene investito da vento di forte intensità. L'aria, muovendosi attorno ad esso crea un differenziale di pressione: una zona a pressione positiva (la parte dell'edificio che fronteggia il vento) e una zona a pressione negativa (la facciata posta sottovento). L'interno dell'edificio è invece una zona neutra. Se si verifica la rottura dell'involucro edilizio a pressione positiva, la facciata precedentemente sottovento diventa un diaframma tra due zone con un forte gradiente di pressione: vi è la possibilità che l'elemento possa crollare. L'integrità delle chiusure è fondamentale per garantire la stabilità degli edifici sottoposti all'azione di venti devastanti. Questi elementi, e in particolare le superfici vetrate, sono però soggetti all'impatto dei *flying debris*, ovvero dei detriti volanti trasportati dal vento.

Anche nel caso non sia compromessa la stabilità, il danneggiamento delle vetrate di un edificio può causare di danni economici rilevanti:





- costo per il ripristino dell'involucro danneggiato;
- perdita economica per il mancato utilizzo dei locali interessati dal danno;
- danni causati dall'ingresso dell'acqua meteorica.

La resilienza degli infissi esterni viene garantita grazie allo sviluppo di tecniche di assemblaggio delle lastre di vetro al frame metallico e di laminazione delle lastre stesse – ovvero l'accoppiamento di due o più lamine di vetro grazie all'interposizione di *interlayer* che garantiscono una resistenza residua post impatto e post rottura del vetro. L'*interlayer* maggiormente utilizzato è il PVB (*polyvinyl butyral*), ma nuove soluzioni, come lo Ionoplast, sono 100 volte più rigide e cinque volte più resistenti allo strappo. Sono queste le maggiormente indicate per realizzare facciate resistenti ai tornado (Block et al., 2015), che si differenziano dai cicloni per una forza impulsiva di maggiore intensità.

Mentre lo spessore del vetro per la laminazione viene calcolato considerando il carico da vento e la tipologia di *interlayer*, la resistenza alla penetrazione del missile nel test di impatto per i vetri resistenti ai cicloni o ai tornado è determinata dal tipo e dallo spessore dell'*interlayer*.

### Originalità della ricerca presentata

È stato verificato a livello internazionale quali sono le prescrizioni vigenti nei vari paesi interessati da venti da uragano e da tornado, al fine di individuare le

intense impulsive force.

The thickness of the glass sheet depends on the wind load and on the interlayer typology; the resistance to missile penetration in the impact test for the cyclone/tornado resistant glass depends on type and thickness of the interlayer.

### Originality of the research

The requirements in the various countries affected by hurricane and tornadoes have been internationally verified, which can help identify possible solutions to be used in European and Italian context. Therefore, a comprehensive analysis of the national and local building regulations of almost all countries affected by these events has been carried out. Particular attention was focused on the Asian countries which, because of the recent growth in tall building development, could have in-

troduced interesting tools to verify the performance of the building envelope, especially of the curtain wall, considering the frequency of the meteorological events.

The identified codes describe, according to the different levels of protection required and the geographical location of the buildings, performance levels that the facades must guarantee, independent of the specific design solutions adopted. These codes describe tests that must be conducted on the building envelope.

This analysis represents, to the knowledge of the authors, the first extended comparison on such a large territorial scale on this specific topic.

### The state-of-the-art international laws

The United States are the most developed country for building resilience requirements against these devastating

possibili soluzioni da utilizzare in contesto europeo e italiano. Si è quindi condotta un'analisi esaustiva dei regolamenti edilizi nazionali o locali della quasi totalità dei Paesi interessati da questi fenomeni. Ci si è concentrati in particolare sui Paesi asiatici che, in virtù del *boom* edilizio, avrebbero potuto introdurre interessanti strumenti atti a verificare la *performance* dell'involucro degli edifici, e in particolare del *curtain wall*, considerata la frequenza con cui questi fenomeni meteorologici si verificano in quest'area.

I codici individuati prescrivono, in base ai diversi gradi di protezione e alle coordinate geografiche degli edifici, livelli prestazionali che le facciate debbono garantire, indipendentemente dalle specifiche soluzioni progettuali adottate: dei test da condurre sull'involucro edilizio.

Questa analisi rappresenta, a conoscenza degli autori e degli interlocutori privilegiati intervistati, il primo confronto esteso su una così ampia scala territoriale in merito all'argomento specifico.

### Lo stato dell'arte nella normativa internazionale

Ad oggi il paese in cui riscontriamo le richieste più sviluppate per ciò che riguarda la resi-

lienza degli edifici ai fenomeni meteorologici devastanti presi in esame sono gli Stati Uniti.

Grande attenzione per la resistenza dell'involucro, dopo i primi sviluppi australiani, si è venuta a creare in Florida, a seguito della

meteorological examined phenomena. Great attention to the resistance of the building envelope has been created in Florida (the first developments were the Australian codes), following the devastating Hurricane Andrew in 1992. The Florida Building Code introduced strict requirements for the building glazed enclosures, providing for specific pass/fail tests, which both "industrial" and artistic façades must undergo. The Testing Application Standards 201 and 203 (ICC, 1994), define two tests: the impact test – of small missiles and large missiles – and the positive/negative pressure cycling test.

The small missiles are steel balls weighing 2 g, which are thrown both against the glass and against the window frame at a speed of 39.6 m/s (for building envelopes higher than 9.1 m above the ground floor, corresponding to the first three floors). The large missiles

are wooden missiles weighing 4.1 kg and with a 100x50 mm size; these are thrown with a compressed air cannon at 15.3 m/s, in well-defined areas, on the glass and on the window frame (for building envelopes at a height of less than 9.1 m above the ground floor).

The two tests simulate the consequences of the gravel and of a small structural element impacts on the building envelope. After the impact test, the 9,000 positive/negative pressure cycling follows, in order to check the residual stability of the element. This pressure cycling test is recognized by the scientific community as fundamental for the simulation of the real conditions of an exceptionally windy weather event. This represents the greatest difference in the testing when compared against the Australian code.

Hurricane-resistant façade test requirements were introduced nationwide in

devastazione portata dall'uragano Andrew del 1992. Il regolamento edilizio della Florida sviluppato in seguito ha introdotto test stringenti per gli involucri vetrati degli edifici, prevedendo specifiche prove *pass/fail* alle quali i componenti sia "industriali" sia non prodotti in serie devono essere sottoposti. Le Testing Application Standards 201 e 203 (ICC, 1994), definiscono due prove a cui il *curtain wall* deve resistere: l'impatto – degli *small missiles*, dei *large missiles* – e successivamente i cicli di pressione/depressione. Gli *small missiles* sono sfere di acciaio del peso di 2 g che vengono sparate sia contro il vetro che contro il telaio della finestra a una velocità di 39.6 m/s (tamponamento verticale ad altezza superiore a 9.1 m rispetto alla superficie del suolo, corrispondente ai primi tre piani). I *large missiles* sono invece dei profili di legno del peso 4,1 kg e delle dimensioni di 100x50 mm lanciati con un cannone ad aria compressa, in questo caso ad una velocità di 15,3 m/s, in punti ben definiti dalla norma, sul vetro e sul telaio della finestra analizzata (tamponamento verticale ad un'altezza inferiore a 9.1 m rispetto alla superficie del suolo). I due test simulano le conseguenze dell'impatto della ghiaia e di un piccolo elemento strutturale sull'involucro dell'edificio. A questi test seguono poi 9,000 cicli di pressione/depressione, per verificare la stabilità residua dell'elemento. L'ultima fase del test è riconosciuta dalla comunità scientifica come fondamentale per la simulazione delle condizioni reali di un fenomeno ventoso eccezionale; rappresenta la più grande originalità del test, rispetto a quanto sviluppato in precedenza in Australia.

I protocolli per il test delle facciate resistenti agli uragani vengono poi introdotti a livello nazionale negli Stati Uniti con le norme ASTM E 1886 (ASTM, 2013) e ASTM E 1996 (ASTM, 2014), che vengono prese come test di riferimento dal codice statunitense

the United States with ASTM E 1886 (ASTM, 2013) and ASTM E 1996 (ASTM, 2014), which are taken as reference tests from the US Building Code ASCE 7 (ASCE, 2016).

The Post-Hurricane Wilma Progress Assessment (Miami Dade County Building Code Compliance Office, 2006) reported no significant damage to constructions built following the latest construction code. This proved that the glazed building enclosures tested according to the impact and pressure cycling tests could withstand a hurricane. This was further confirmed by the Performance of Laminated Glass during Hurricane Wilma in South Florida (Glazing Consultants International LLC, 2006).

The second unpredictable meteorological event examined in this paper for building resilience is the tornado. The curtain wall is tested with impact

and positive/negative pressure cycling tests also for tornado resistance. In the United States, the same ASTM standard used for anti-hurricane façades are adopted, with the highest level of performance (level E) or the volunteer standard FEMA P 361 (FEMA, 2015) required for tornadoes. This requires the building envelope to withstand the impact of a 6.8 kg heavy and 3.6 m long wooden missile impacting at 45 m/s. The façade passes the test when: the missile does not penetrate the glazing, the glazing remains attached to its frame, and the glass fragments remain attached to the specimen. The requirements are more stringent than any level of protection which could be found in the ASTM.

**Objectives and Research Methodology** 137 documents were initially collected (Mejorin et al., 2018a): international

delle costruzioni ASCE 7 (ASCE, 2016).

Il Post Hurricane Wilma Progress Assessment (Miami Dade County Building Code Compliance Office, 2006) ha riportato che non ci fu danno considerevole nelle costruzioni realizzate seguendo il più recente Codice delle Costruzioni: le vetrazioni testate secondo il test di impatto e di pressione/depressione sopra descritti, hanno resistito all'uragano. Il tutto confermato dal Performance of Laminated Glass during Hurricane Wilma in South Florida (Glazing Consultants International LLC, 2006).

Il secondo imprevedibile fenomeno meteorologico preso in esame per la resilienza degli edifici nel presente *paper* è quello del tornado, al quale ci si riferisce comunemente con i termini di tromba d'aria o turbine. Anche per la resistenza a questo fenomeno il *curtain wall* viene testato nel suo insieme e deve subire delle prove di impatto e cicli di pressione/depressione. Negli Stati Uniti viene utilizzato lo stesso standard ASTM dei test anti-uragano, con il massimo livello di prestazione (livello E) oppure il volontario standard FEMA P 361 (FEMA, 2015), che per ogni condizione di vento prevede una resistenza all'impatto di un missile in legno da 6.8 kg lungo 3.6 m, con una velocità di 45 m/s. Il test risulta superato quando: il missile non perfora la vetratura, la vetratura rimane adesa alla propria cornice e i frammenti di vetro rimangono attaccati al provino. I requisiti risultano essere di gran lunga più stringenti di qualsiasi livello di protezione si trovi nelle ASTM.

## Obiettivi e metodologia della ricerca

Sono stati presi inizialmente in considerazione 137 documenti (Mejorin et al., 2018a): internazionali; degli Stati Uniti, vista la forte presenza sia di uragani sia di tornado; australiani e neozelandesi; di 10 Paesi asiatici, che sono

ones; United States ones, due to the frequency of both hurricanes and tornadoes; Australian and New Zealander ones; and codes and standards of 10 Asian countries, which are in typhoon or tropical cyclone prone areas. The documents were acquired and translated when necessary and their relevance was verified for the purposes of the research. In the end, 9 codes and 10 regulations were identified and considered for a more detailed analysis.

From a first analysis of the international codes it became clear that the requirements of the three basic documents analyzed (ICC, International Building Code, 2015; ICC, Florida Building Code, 2015; AS / NZS, AS / NZS 1170.2, 2016) were too stringent for severe wind events (sustained winds speeds and gusts force) that will occur in Europe. The analysis of the codes adopted on a large scale was aimed at

highlighting any intermediate level of protection, which was adopted in other countries and may be applicable to Europe.

## Analysis results

The outcome of the analysis allowed the strengths and weaknesses of each document to be highlighted. The tests for the product certification internationally available are identified by the ISO 16932 standard (ISO, 2006), which is based on the ASTM E 1886 (ASTM, 2013) and the ASTM E 1996 (ASTM, 2014). These two ASTM standards have been tested *in situ* and they are effective.

There are few Asian countries, among the 10 analyzed, which provide requirements for hurricane-resistant building envelope constructions. Despite the frequency of the storm events in this area, only 2 have mandatory tests to

Tab. 1 - I 10 Paesi soggetti a tifone considerati nell'analisi e i test richiesti per le facciate nei diversi Paesi  
The 10 analyzed typhoon-prone countries and façade tests requirements

Test requirements for hurricane resistant façades	
Bangladesh	ASTM E 1886, ASTM E 1996
China	No
Hong Kong	No
India	No
Japan	No – in progress based on ISO 16932
Philippines	ASTM E 1886, ASTM E 1996
Sud Korea	No
Taiwan	No
Thailand	No
Vietnam	No

soggetti a tifone o a ciclone tropicale. I documenti sono stati acquisiti e tradotti ove necessario e ne è stata verificata la rilevanza ai fini della ricerca e tra questi sono poi stati individuati 9 codici e 10 norme ritenute meritevoli di un'analisi più dettagliata.

Fin da una prima analisi dei codici internazionali è parso evidente che le richieste presenti nei tre documenti base analizzati (ICC, International Building Code, 2015; ICC, Florida Building Code, 2015; AS/NZS, AS/NZS 1170.2, 2016) risultano essere eccessivamente stringenti per la tipologia di fenomeni (velocità dei venti sostenuti e forza delle raffiche) riscontrabili e prevedibili per il futuro in Europa. L'analisi dei codici adottati su un'ampia scala era mirata a mettere in evidenza eventuali livelli intermedi di prescrizioni adottate in altri Paesi e applicabili anche in Europa.

**Risultati dell'analisi svolta** L'esito dell'analisi ha permesso di evidenziare i punti di forza e di debolezza del campione analizzato. I test per la certificazione del prodotto presenti a livello internazionale, sono rappresentati dalla norma ISO 16932 (ISO, 2006), che si basa sulle ASTM e risulta quindi efficace, visto che le norme ASTM E 1886 (ASTM,

conduct on the building envelope: Bangladesh (HBRI, 2014) and the Philippines (ASEP, 2010). Moreover, but not for Australia and New Zealand that have their own specific regulation for cyclone resistance, all countries in which there is some indication refer to the ASTM standards. Japan will include testing requirements for typhoon-resistant facades in the near future and the international standard ISO 16932 (ISO, 2006) will be its reference. The Japanese JIS Committee is working to adapt the missiles in the test to be similar to that of the local urban environment. The impact test missiles will have a shape similar to the traditional Japanese roof tiles (Maruyama et al., 2013). The Australian and New Zealand regulations is recognized from the scientific community as too strict, due to the speed of impact of large missiles, which have more than doubled

their speed, following a calculation system that is too conservative (Lin et al., 2007). The AS/NZS 1170.2 (AS/NZS, 2016) is at the same time not exhaustive for the representation of storm events, not requiring the façade to withstand the positive/negative pressure cycling test after the impact test.

#### Applicability of research results to the European context

Even though climate changes and the extremism of the weather phenomena previously described is present, Europe is naturally protected from phenomena of intensity comparable to the hurricanes in the American states and tornadoes in the Midwest. The laws that regulate the atmospheric depressions movements let an hurricane (which developed in the tropical belt of the Atlantic in the northern hemisphere) reach the coasts of Northern

Tab. 2 - Livelli di protezione per categorie di edifici secondo ISO 16932, 2015  
Protection levels for building categories according to ISO 16932, 2015

Levels of protection	
1	Unprotected buildings and other structures, which are expected to have low hazard to human life in a cyclones and other severe storms (i.e.: storage facilities, temporary facilities, etc.)
2	Buildings which are expected to have moderate hazard to human life in cyclones and other severe storms (i.e.: houses, commercial and industrial buildings, etc.)
3	Buildings where a significant number of people congregate in one area (i.e.: schools, shopping centers, hotels, major office buildings, etc.)
4	Essential facilities (i.e.: hospitals, police stations, etc.) or storm shelters

2013) e ASTM E 1996 (ASTM, 2014), come esplicitato in precedenza, hanno avuto modo di essere testate in opera.

Nonostante ciò, è emerso come pochi siano i Paesi asiatici, tra i 10 analizzati, che prevedano prescrizioni per la realizzazione di involucri edilizi resistenti agli uragani. Nonostante la frequenza di tale tipo di fenomeni non sia trascurabile solo 2: Bangladesh (HBRI, 2014) e Filippine (ASEP, 2010). Inoltre, ad esclusione dell'Australia e della Nuova Zelanda che hanno la propria normativa specifica sul tema, tutti i Paesi nei quali qualche indicazione ad oggi è presente fanno riferimento ai test di impatto presenti negli standard ASTM. Il Giappone inserirà requisiti di test per le facciate resistenti ai tifoni, prendendo a modello l'internazionale ISO 16932 (ISO, 2006), adeguandola con la propria commissione di tecnici alle costruzioni dell'ambiente urbano locale. I missili per i test di impatto avranno una sagoma che si rifà alle tegole degli edifici tradizionali giapponesi (Maruyama et al., 2013).

La normativa australiana e neozelandese ad oggi viene riconosciuta come troppo stringente, per le velocità di impatto dei *large missiles*, che hanno più che duplicato la propria velocità, seguendo un sistema di calcolo troppo conservativo, basandosi sui ri-

Europe, after its strength dissipation - such as the previously mentioned Hurricane Ophelia. Otherwise, the Mediterranean basin is not sufficiently large and nor placed at the correct latitude to consent the formation of real hurricanes. Likewise, even local phenomena such as tornadoes do not have sufficient "space" in Europe to reach the same violence of the corresponding phenomena found in the great American plains. Despite this, it is necessary to take into account the experiences gained abroad to guarantee the proper design of the building envelope, even in our contexts.

#### The Italian and European regulation context

On the international scene, the protocol for the certification of glazed building components as impact-resistant during devastating meteorological

events developed by the United States has been the reference for the ISO 16932 standard (ISO, 2006). Although the standard exists, this is not required in the European and Italian context, even for essential facilities such as hospitals, schools, etc.

It is desirable that, even in the European context, minimum performances of the building envelope will be guaranteed, at least for the essential facilities, in order to ensure essential services following destructive events (Mejorin et al., 2017b).

The same ISO 16932 standard (ISO, 2006) could also be used to certify products capable of withstanding European tornados, which getting stronger day-by-day due to climate change, in a similar way to how the United States adopted the ASTM E 1886 (ASTM, 2013) and ASTM E 1996 (ASTM, 2014). In the Mediterranean area, these

Tab. 3 - Missili richiesti per i test sulle facciate secondo ISO 16932, 2015  
Missiles required for tests on façades according to ISO 16932, 2015

Missile type	Missile	Impact Speed (m/s)
A	(2 ± 1) g (small steel ball)	39.7
B	(1 ± 0.1) kg (small lumber)	15.3
C	(2.05 ± 0.1) kg (small lumber)	12.2
D	(4.1 ± 0.1) kg (medium lumber)	15.3
E	(4.1 ± 0.1) kg (medium lumber)	24.4

sultati di letteratura (Lin et al., 2007). La AS/NZS 1170.2 (AS/NZS, 2016) allo stesso tempo risulta essere non esaustiva per la rappresentazione del fenomeno atmosferico, non richiedendo il test della facciata di cicli di pressione positiva/negativa dopo quelli di impatto.

### Applicabilità dei risultati della ricerca al contesto Europeo

L'Europa si trova naturalmente protetta da fenomeni di intensità paragonabile a quella degli uragani e dei tornado degli stati americani del Midwest. Le leggi che governano il movimento delle depressioni atmosferiche fanno sì che un uragano sviluppatosi nella fascia tropicale del Atlantico nell'emisfero boreale possa raggiungere le coste del Nord Europa solo dopo aver dissipato gran parte della sua forza – come l'Uragano Ophelia citato in precedenza. Al contrario, il bacino del Mediterraneo non è né sufficientemente grande, né collocato alla giusta latitudine per consentire la formazione di veri e propri uragani. Allo stesso modo, anche i fenomeni locali quali le trombe d'aria non hanno in Europa lo "spazio" sufficiente per formarsi con la stessa violenza dei corrispondenti fenomeni riscontrabili nelle grandi pianure americane. Nonostante questo, è necessario tenere in considerazione le esperienze maturate all'estero per prevedere l'adeguata progettazione, anche nei nostri contesti, dell'involucro edilizio.

events can be the most destructive atmospheric events.

### Conclusions

With the exception of some specific buildings, scenes of complete devastation of the built environment like those shown by the media show when a tornado or hurricane occurs have never been seen in Europe. This is due to the combined effect of less strength of the storm events and the more massive technologies commonly adopted for the constructions, compared to light balloon-frames or similar systems that still characterize many constructions in other continents. Nonetheless, ongoing climate change is leading to increasingly intense atmospheric events in Europe. At least the essential facilities should be designed in order to guarantee flying-borne debris resistance. The ISO 16932 standard (ISO, 2006), at

Pur nel contesto dei cambiamenti climatici e dell'estremizzazione dei fenomeni meteorologici descritti in precedenza,

least for category 4 buildings, indicated for essential facilities such as hospitals, barracks, etc., could represent a starting point for building envelope product approval process also in the Italian and European context. However, the indicated reference performance levels (the impact speed and the weight of the missiles) should be adequately calibrated to the already found or predictable events in these territories, in order to avoid a useless and costly overestimation of the impacts resistance performance required.

### ACKNOWLEDGMENTS

The research was conducted in an agreement between the Iuav University of Venice and the Council on Tall Buildings and Urban Habitat, thanks to the Kuraray - Trosifol World of Interlayers sponsorship (Trabucco et al., 2017).

Tab. 4 - Categoria di missile in funzione del livello di protezione e zona di vento sulle facciate secondo ISO 16932, 2015

Category of missile according to the level of protection and wind zone on the façades according to ISO 16932, 2015

	Level of protection							
	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 3	Level 2	Level 1	Level 1
Height of assembly (elevation)	> 10 m > 10 m > 10 m > 10 m > 10 m > 10 m > 10 m > 10 m							
Wind Zone 1	N	N	A	B	B	C	C	D
Wind Zone 2	N	N	A	B	B	C	C	D
Wind Zone 3	N	N	A	C	B	D	D	E
Wind Zone 4	N	N	A	C	B	D	D	E

NOTE:

A, B, C, D, and E: refer to Tab. 3

N: means that testing is not required

### Il contesto normativo Italiano e Europeo

Nel panorama internazionale si è tradotto il protocollo per la certificazione dei componenti edilizi vetrati come resistenti ad impatti durante fenomeni meteorologici devastanti presente negli Stati Uniti, grazie alla norma ISO 16932 (ISO, 2006). Nonostante lo standard sia presente, questo non viene richiesto nel contesto europeo e italiano, nemmeno per le costruzioni di prima necessità come ospedali, scuole, ecc. È auspicabile che si inizi a prevedere, anche in contesto europeo, delle prestazioni minime che l'involucro esterno debba garantire, almeno per gli esercizi di prima necessità, per assicurare il funzionamento anche a seguito di eventi distruttivi (Mejorin et al., 2017b).

Lo stesso standard ISO 16932 (ISO, 2006) potrebbe essere utilizzato anche, come avviene per le ASTM E 1886 (ASTM, 2013) e ASTM E 1996 (ASTM, 2014) negli Stati Uniti, per certificare prodotti in grado di resistere alle trombe d'aria, sempre più volente a causa dei cambiamenti climatici. Nell'area del Mediterraneo questi fenomeni costituiscono l'evento atmosferico più distruttivo riscontrabile.

## Conclusioni

Ad esclusione di alcuni singoli edifici, scene di completa devastazione del costruito come quelle che i media mostrano al passaggio di un tornado o di un uragano non sono mai state riscontrate in Europa, per l'effetto combinato della minore violenza dei fenomeni e delle differenti tecnologie costruttive massive adottate per gli edifici rispetto al leggero *balloon-frame* o sistemi simili che ancora caratterizzano molte costruzioni negli altri continenti. Ciononostante, i cambiamenti climatici in atto stanno portando fenomeni atmosferici sempre più intensi anche in Europa. Almeno le strutture essenziali dovrebbero quindi essere progettate in modo da garantire la resistenza del loro involucro all'impatto di oggetti trasportati dal vento in occasione di tali fenomeni. Lo standard ISO 16932 (ISO, 2006), perlomeno per categorie di edifici che ricadono all'interno del livello di protezione 4, indicato per strutture essenziali come ospedali, caserme, ecc., potrebbe rappresentare un punto di partenza per giungere a un livello di certificazione degli involucri edilizi anche in contesto italiano e europeo. Tuttavia, i livelli prestazionali di riferimento indicati (e quindi le velocità di impatto e il peso dei missili) dovrebbero essere adeguatamente calibrate ai fenomeni già riscontrabili o prevedibili nei territori interessati, per evitare una inutile e onerosa sovrastima delle *performance* di resistenza agli impatti richieste.

## RINGRAZIAMENTI

La ricerca è stata condotta in seno a una convenzione stipulata tra l'Università Iuav di Venezia e il Council on Tall Buildings and Urban Habitat, grazie a un finanziamento ricevuto da Kuraray – Trosifol World of Interlayers (Trabucco et al., 2017).

## REFERENCES

- American Society of Civil Engineers (2016), *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*, ASCE 7-16.
- Ansa (2017), available at: [http://www.ansa.it/emiliaromagna/notizie/2016/01/11/raffica-di-vento-a-238-kmh-nel-modenese\\_8bced39c-a755-44b9-94db-8fc498877ff2.html](http://www.ansa.it/emiliaromagna/notizie/2016/01/11/raffica-di-vento-a-238-kmh-nel-modenese_8bced39c-a755-44b9-94db-8fc498877ff2.html).
- AS/NZS (2016), *Structural Design Actions - Part 2: Wind Actions*, Incorporating Amendments, No. 1, 2, 3 and 4 to Australian/New Zealand Standard.
- ASEP (2010), *C101-10 National Structural Code of the Philippines*, Volume 1, Quezon City.
- ASTM E 1886-13a (2013), *Standard Test Method for Performance of Exterior Windows, Curtain Walls and Storm Shutters Impacted by Missiles and Exposed to Cyclic Pressure Differentials*.
- ASTM E 1996-14a (2014), *Standard Specification for Performance of Exterior Windows, Curtain Walls and Storm Shutters Impacted by Windborne Debris in Hurricanes*.
- Block, V. L., Czyzewicz, R. C. and Rinehart, D. M. (2015), "Designing Impact Glazing to Meet Tornado Performance Standards", *Glass Performance Days 2015 Proceedings*, pp. 126-129, Tampere, FL.
- Darwin Reconstruction Commission (1975), *Darwin Area Building Manual*.
- Experimental Building Station of the Department of Construction (1978), *Guidelines for the Testing and Evaluation of Products for Cyclone-Prone Areas*, Technical Record 440.
- FEMA P 361 (2015), *Safe Rooms for Tornadoes and Hurricanes: Guidance for Community and Residential Safe Rooms*.
- Glazing Consultants International LLC (2006), *Performance of Laminated Glass during Hurricane Wilma in South Florida*.
- Global Risk Data Platform (2017), available at: <http://preview.grid.unep.ch/> (accessed 18 December 2017).
- HBRI (2014), *Bangladesh National Building Code*.
- ICC (2015), *Florida Building Code, Building*.
- ICC (1994), *Impact Test Procedures*. Florida Building Code Test Protocols for High-Velocity Hurricane Zones, TAS 201-94.
- ICC (1994), *Criteria for Testing Products Subject to Cyclic Wind Pressure Loading*, Florida Building Code Test Protocols for High-Velocity Hurricane Zones, TAS 203-94.
- ISO 16932 (2015), *Glass in building - Destructive-windstorm-resistant security glazing - Test and classification*.
- Lin, N., Holmes, J. D. and Letchford, C. W. (2007), "Trajectories of Wind-Borne Debris in Horizontal Winds and Applications to Impact Testing", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 133, pp. 274-282.
- Maruyama, T., Kawai, H., Nishimura, H. and Hanatani, M. (2013), "Missile Impact Resistant Test of Glasses According to ISO 16932", *Journal of Disaster Research*, Vol. 8, No. 6., pp. 1114-1119.
- Mejorin, A., Miranda, W. (2017a), "Climate Change and Façade Resilience", *Officina*, No. 19 ottobre-novembre-dicembre 2017, pp. 42-47.
- Mejorin, A., Trabucco, D., Stelzer, I., Nakada, R., Rooprai, M.S. (2018b), "Cyclone-Glazing and Façade Resilience for the Asia Pacific Region: Market Study and Code Survey", *CTBUH Journal*, No. II, pp. 42-47.
- Mejorin, A., Trabucco, D., Stelzer, I., Nakada, R., Rooprai, M.S. (2018a), *Cyclone-Glazing and Façade Resilience for the Asia Pacific Region*, Council on Tall Buildings and Urban Habitat. ISBN 978-0-939493-61-6.
- Mejorin, A., Trabucco, D. (2017b), "Resilienza del curtain wall: analisi delle normative internazionali per contrastare i cambiamenti climatici", *L'Ufficio Tecnico*, No. 11-12, pp. 82-89.
- Miami Dade County Building Code Compliance Office (2006), *Post Hurricane Wilma Progress Assessment*.
- Siggins, L. (2017), "Storm Ophelia: Facts and figures of the strongest east Atlantic hurricane in 150 years", *The Irish Times*.
- Trabucco, D., Mejorin, A., Miranda, W., Nakada, R., Troska, C. and Stelzer, I. (2017), "Cyclone Resistant Glazing Solutions in the Asia-Pacific Region: a Growing Market to Meet Present and Future Challenges", *Glass Performance Days 2017 Proceedings*, pp. 64-69, Tampere, FL.