

Eleonora Chesi, Paola Perazzo, Chiara Calderini, Andrea Giachetta,

Dipartimento di Scienze dell'Architettura, Scuola Politecnica dell'Università degli Studi di Genova, Italia

eleonora.chesi@gmail.com

paola.perazzo.93@gmail.com

chiara.calderini@unige.it

andrea.giachetta@arch.unige.it

**Abstract.** Il presente articolo affronta il tema della vulnerabilità sismica degli edifici industriali monopiano, proponendo la progettazione di un nuovo sistema di tamponamento capace di assecondare il movimento della struttura portante durante i terremoti. Obiettivi di tale soluzione a maggior resilienza, progettata con elementi prefabbricati e giunzioni struttura-involucro innovativi, sono il miglioramento delle prestazioni degli edifici industriali in caso di sisma e l'ottimizzazione strutturale del loro sistema portante con possibili conseguenze anche in termini di sostenibilità ambientale, considerata la possibile riduzione del materiale costruttivo e dell'energia inglobata in fase produttiva e di trasporto.

**Parole chiave:** progettazione anti-sismica, prefabbricazione, edilizia industriale, sistemi di involucro, sostenibilità.

## Introduzione: problemi degli edifici a destinazione produttiva in aree interessate da eventi sismici

Tra gli enormi danni prodotti dai più importanti eventi sismici nel nostro paese, molto significativi sono quelli legati ai settori agricolo e industriale. Per quanto riguarda quest'ultimo, la scar-

sa resilienza delle soluzioni costruttive prefabbricate, le più diffusamente impiegate per gli edifici produttivi, ha determinato crolli, danni e situazioni di inagibilità con gravi conseguenze dirette su persone e beni (talora con complicazioni legate alla pericolosità di lavoratori, semi-lavorati, sostanze o processi impiegati) e ripercussioni economico-sociali indirette, per il forzoso e spesso definitivo blocco delle attività.

Dai sopralluoghi effettuati (INGV, Protezione Civile, ENEA) per verificare lo stato del patrimonio edilizio dopo gli ultimi terremoti italiani (in particolare, quello dell'Emilia Romagna del 2012), emerge un numero rilevante di edifici produttivi danneggiati da eventi sismici (ANCE/CRESME, 2012). Solo in relazione

High resilience prefabricated systems for the industrial buildings in seismic areas

**Abstract.** This article deals with the topic of seismic vulnerability of single-storey industrial buildings, proposing the design of a new system able to support the movement of the load-bearing structure during earthquakes. The targets of this solution at greater resilience, designed with prefabricated elements and innovative structure-cladding junctions, are the improvement of the performances of the industrial buildings in case of earthquake and the structural optimization of their load-bearing system with possible consequences for environmental sustainability, considering the possible reduction of construction material and energy during the production and transport phase.

**Keywords:** seismic design, prefabrication, industrial buildings, cladding systems, sustainability.

al terremoto del 2012, i danni calcolati per edifici e impianti del comparto produttivo ammontano a oltre due miliardi di euro ai quali ne vanno sommati altri tre circa per perdite legate all'interruzione dei processi produttivi; diverse sono le vittime dovute alle conseguenze del terremoto su edifici industriali, nonostante le scosse più importanti non siano avvenute in orario lavorativo, e migliaia sono i posti di lavoro persi e ancora potenzialmente a rischio (Liberatore, 2013). Si tratta di un problema molto importante se si considera che, in Italia, oltre novantacinquemila strutture produttive sono potenzialmente esposte a rischi naturali elevati ricadendo in territori sensibili (ANCE/CRESME, 2012).

La maggior parte delle strutture produttive esistenti in Italia sono di recente costruzione: solo il 7,5% risale al periodo precedente al 1950 e ben il 68% è posteriore al 1970 (ANCE/CRESME, 2012). Ciononostante, la grande maggioranza di questi edifici non sono conformi alle attuali prescrizioni normative antisismiche, dimostrandosi in molti casi incapaci di sopportare eventi sismici significativi. La legislazione in materia, infatti, ha attraversato un complesso iter che solo in anni recenti ha portato a classificare l'intero territorio nazionale a rischio sismico e a fare propri gli avanzamenti della ricerca nel campo dell'ingegneria sismica consolidatosi negli anni '80-'90.

La prima zonizzazione sismica, avvenuta attraverso il Regio Decreto 193 del 1909 emanato dopo i terremoti di Reggio Calabria e Messina del 1908, teneva conto dei territori colpiti da forti terremoti di cui si aveva notizia negli ultimi cento anni. La prima vera legge in materia antisismica è però la n. 64 del 1974 che ha

## Introduction: problems of industrial buildings in the areas affected by seismic events

Among the enormous damages caused by the earthquakes in our country, the most significant are those related to the agricultural and industrial sectors. The low resilience of the precast construction solutions, that are the most commonly used for the industrial buildings, has caused collapses, damages and inaccessibility with serious consequences on people and property (sometimes with great risks due to the dangerousness of worked products, semi-finished products, substances or processes used) and economic and social impacts for the forced and often definitive stop of the activities.

The inspections carried out (INGV, Civil Protection, ENEA) to check the state of the buildings after the last Italian earthquakes (in particular in Emilia

Romagna of 2012), have shown a significant number of industrial buildings damaged by seismic events (ANCE/CRESME, 2012).

Regarding the earthquake of 2012, the damages calculated for buildings and facilities of the production sector are more than two billion euros, about three billion have been added for losses due to the production interruption; there have been several victims due to the consequences of the earthquake on the industrial buildings, although the major shocks have not occurred during the working hours, thousands of jobs have been lost and still potentially at risk (Liberatore, 2013).

This is a very important problem if we consider that in Italy more than ninety-five thousand production facilities are potentially subjected to high natural risks (ANCE/CRESME, 2012).

Most of the existing production fa-

consentito, la suddivisione del territorio in tre categorie sismiche con la classificazione di circa il 45% del suolo italiano in una di tali categorie. Solo nel 2003, attraverso l'Ordinanza PCM 3274, tutto il territorio è stato classificato come sismico e suddiviso in quattro zone a differente livello di pericolosità. Soltanto nel 2008 però sono state emanate le nuove Norme Tecniche di costruzioni, vigenti ancora oggi.

La stragrande maggioranza di capannoni industriali nel territorio nazionale è costituita da edifici monopiano prefabbricati con strutture in calcestruzzo armato o acciaio, caratterizzate principalmente dalle grandi luci di copertura. Gli edifici realizzati con elementi prefabbricati in cemento armato sono generalmente costituiti da pilastri con plinti a pozzetto, travi di collegamento e travi reggi tamponamento, travi di copertura distinte in travi a doppia pendenza per copertura a falde inclinate e in travi piane, collegate agli elementi verticali tramite vincoli rigidi o di semplice appoggio. Gli edifici monopiano in acciaio sono caratterizzati da una maggiore leggerezza complessiva a parità di luce e di capacità di carico della struttura. Per la loro grande eterogeneità di destinazioni e forme possono essere presenti diversi elementi strutturali, tra cui i principali sono: montanti; travi di bordo; capriate di copertura, generalmente reticolari; arcarecci; controventi.

Nella maggior parte degli edifici monopiano, il sistema di chiusura verticale è caratterizzato da pannelli prefabbricati in cemento armato che differiscono per finitura superficiale, dimensioni, coibentazione ed alleggerimento. Esistono differenti sistemi di connessione del sistema di chiusura con quello strutturale in corrispondenza delle travi di copertura e di travi dedicate (travi porta-pannello) e/o in corrispondenza dei montanti vertica-

lities in Italy have been recently built: only the 7,5% is dated before 1950 and the 68% is after 1970 (ANCE/CRESME, 2012).

Nevertheless, the majority of these buildings are not in compliance with the current anti-seismic regulations, showing in many cases to be unable to bear significant seismic events. The legislation has led only recently to the classification of the whole national territory at seismic risk and to take in charge the progress of the research in the field of seismic engineering consolidated in the period between 1980 and 1990.

The first seismic zoning issued after the earthquakes of Reggio Calabria and Messina of 1908 through the Royal Decree 193 of 1909, took into account the territories affected by great earthquakes reported in the last hundred years. The first true law on anti-seismic matter, however, was the law No. 64 of 1974,

which allowed the division of the territory into three seismic categories with the classification of about 45% of Italian territory in one of these categories.

Only in 2003, through the decree PCM 3274, the whole territory was classified as seismic and divided into four zones with a different level of danger. In 2008 the new Technical Standards of Construction have been issued and still in force today.

The majority of industrial buildings in our country are single-storey buildings with reinforced concrete or steel structures, mainly characterized by large spans. The buildings constructed with precast reinforced concrete elements are generally made up of columns standing on foundations plinths, double slope or flat beams connected to vertical elements by rigid links or simple supports, and secondary beams supporting cladding and ceilings.

li. Principalmente, tali sistemi, dimensionati in funzione degli elevati pesi dei pannelli di tamponamento (elementi di grandi dimensioni alti fino a 10 metri con larghezze intorno ai 2,5 metri) devono far fronte alle sollecitazioni orizzontali (del vento e sismiche) e prevedono soluzioni di ancoraggio che dovrebbero garantire un certo grado di libertà allo spostamento. Le strutture produttive prefabbricate sopra sommariamente descritte hanno mostrato, rispetto agli eventi sismici, problemi di diversa natura, riconducibili non solo a carenze strutturali in sé (perdita di appoggio tra trave e pilastro – es. Ercolino, 2016) ma anche a problemi di connessione tra struttura e involucro. Infatti, il differente comportamento sismico della struttura portante e dell'involucro, nonché la scarsa affidabilità degli elementi di giunzione tra essi, hanno comportato in molti casi, anche quando la struttura non ha subito seri effetti, il danneggiamento, e in alcuni casi il crollo, dei pannelli di tamponamento con conseguenze anche importanti. Questa problematica è risultata determinante dalle analisi condotte su edifici produttivi danneggiati dal terremoto in Emilia-Romagna del 2012 (Liberatore, 2012).

In particolare, nelle strutture danneggiate dal sisma, si sono riscontrati problemi soprattutto in relazione alle connessioni pannello-pilastro e pannello-trave. Tali connessioni vengono infatti generalmente progettate per sostenere i carichi gravitazionali dei pannelli ed evitarne il ribaltamento dovuto alle sollecitazioni orizzontali; tuttavia, in molti casi, hanno dimostrato di essere state concepite senza tener conto in modo appropriato delle importanti sollecitazioni comportate dagli spostamenti laterali dell'edificio che avvengono in caso di sisma (Belleri, 2013).

Anche le connessioni concepite appositamente per permettere i mutui spostamenti necessari in caso di sisma hanno spesso mo-

Single-storey steel buildings are characterized by a greater overall lightness compared to span and load capacity of the structure. Several structural elements are present due to their great variety of destinations and shapes; the main ones are the following: columns; board beams; roof trusses, generally reticulated; purlins; bracings.

In most single-storey buildings, the vertical cladding system is characterized by prefabricated reinforced concrete panels that differ for the surface finishing, size, insulation and lightening.

There are different systems connecting the cladding with the structure in correspondence of the roof beams and lateral beams and/or columns. These systems, sized according to the high weights of the panels (large elements up to 10 meters height and normally about 2.5 meters large), must support horizontal loads (wind and earthquake)

and provide anchoring solutions ensuring a suitable displacement capacity to the structure. The precast industrial buildings above described have shown problems of different nature, with regard to seismic events, not only due to structural deficiencies (loss of support between beams and columns – eg Ercolino, 2016) but also to connection problems between the structure and the cladding. Indeed, the different stiffness of the bearing structure and the cladding, as well as the low reliability of the joining elements, have often produced damages and in some cases the collapse of the panels even when the structure has not suffered seriously. This problem was decisive in the analysis carried out on the industrial buildings damaged by the earthquake in Emilia-Romagna in 2012 (Liberatore, 2012).

In particular, in the structures damaged by the earthquake, there were problems

strato di non funzionare a dovere: tra esse, per esempio, molti dei sistemi di ancoraggio superiore trave-pannello realizzati attraverso due profili a canaletta, l'uno ancorato alla struttura principale e l'altro inserito all'interno dell'elemento di tamponamento durante il getto, generalmente collegati da un connettore a piastrina o a squadretta, talvolta zigrinata in modo da aumentare l'attrito e dissipare in parte la forza sismica. Dopo il sisma dell'Emilia Romagna, infatti, questo tipo di connessioni presentavano spesso problemi quali: una evidentemente insufficiente capacità di spostamento reciproco delle parti; un'elevata e non controllata coppia di serraggio che ha generato all'interfaccia dado-connessione un attrito tale da impedire lo scorrimento; lo slabbramento della canaletta di scorrimento a causa delle enormi forze orizzontali in gioco. I cedimenti delle connessioni, infine, possono essere causati proprio da una realizzazione del collegamento dei pannelli di tamponamento con la struttura principale in maniera troppo rigida, modificando lo schema statico e portando a comportamenti durante l'azione sismica diversi da quelli previsti in fase di progetto (Bournas, 2014).

### **Proposta progettuale per un sistema ad alta resilienza per l'edilizia industriale**

magistrale condotta presso il Dipartimento di Architettura e Design della Scuola Politecnica dell'Università di Genova (seguita da docenti di Tecnica delle costruzioni e Tecnologia dell'architettura) ha messo a punto alcune prime ipotesi volte a migliorare le performance dei sistemi prefabbricati per capannoni industriali

A fronte dei problemi rilevati, anche nell'ambito di iniziative dal consorzio ReLUI (Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica), una recente tesi

especially in relation to the column-panel and the panel-beam connections. Such connections are generally designed to support the gravitational loads of the panels and avoid the overturning due to the horizontal loads; however, in many cases, it has been shown that they have been conceived without taking into proper account the major loads caused by the lateral movements of the building occurring in case of earthquake (Belleri, 2013).

Also the connections have often shown that they do not work properly even if expressly designed to allow mutual movements in case of earthquake. Among them, for example, many of the top-anchoring beam-panel systems are realized through two channel profiles, one anchored to the main structure and the other inserted inside of the element, generally connected by a plate or square connector, sometimes milled to increase

the friction and dissipate part of the seismic force. After the earthquake in Emilia Romagna, indeed, this type of connections often had problems such as: an obvious insufficient capacity for mutual movement of the parts; a high and uncontrollable tightening torque which has generated a friction to the nut-connection interface to prevent the sliding; the tearing of the sliding channel due to the present huge horizontal forces. Finally, the failure of the connections can be caused by a too rigid connection of the panels to the main structure, modifying the static scheme and leading to situations during the seismic action different from those planned during the design phase (Bournas, 2014).

### **Project proposal for a high resilience system for industrial building**

Regarding the above problems, also in the context of the initiatives launched

puntando sul potenziamento delle loro prestazioni di resilienza per garantire una maggiore capacità adattiva dei componenti di involucro rispetto all'azione sismica.

Le soluzioni proposte riguardano la definizione di elementi prefabbricati di tamponamento e giunzioni struttura-involucro innovativi che permettano di meglio assorbire l'azione sismica; viene in particolare approfondita la possibilità di realizzazione di elementi di tamponamento semi-indipendenti dal telaio portante e capaci di sopportare spostamenti per scorrimento/rotazione tali da assecondare i movimenti della struttura durante un evento sismico. La soluzione proposta si basa su un'analisi dello stato dell'arte che ha previsto: un inquadramento normativo; una raccolta dati sui danni subiti dagli edifici industriali nei terremoti 2009-16; la disamina dei sistemi prefabbricati esistenti e delle soluzioni tecnologico-costruttive più diffuse per gli edifici industriali, anche rispetto a studi condotti in ambito internazionale (es. Fisher, 2004; Lamarche, 2009; Saatcioglu, 2013; Tremblay, 2013). In particolare, ci si è concentrati sul sistema di chiusura costituito da pannelli prefabbricati e relative connessioni, analizzando i processi produttivi (con visite in fabbrica) e di cantiere.

La classificazione dei pannelli presenti sul mercato ha permesso di valutare le dimensioni e le prestazioni che devono essere soddisfatte e, tra esse, ad esempio: facilità di realizzazione; durata nel tempo; resistenza agli urti; sicurezza rispetto al tipo di lavorazioni previste e a possibili effrazioni; tenuta al fuoco; sicurezza; isolamento termico e acustico; mantenimento delle caratteristiche di base dopo il sisma.

Nello specifico, lo studio si è concentrato sui sistemi di tamponamento per edifici industriali monopiano in acciaio. L'interesse verso questo tipo di edifici nasce dall'osservazione che a causa

by the ReLUI (University of Seismic Engineering Laboratory Network), a recent master thesis carried out at the Department of Architecture and Design of the Polytechnic School of the University of Genova (followed by the teachers of Structural Design and Architectural Technology) has developed some first hypotheses aimed to improve the performances of the precast systems for industrial sheds, focusing on the enhancement of their resilience performance to ensure a greater adaptive capacity of the cladding components to the seismic action.

The solutions proposed concern the definition of precast elements and innovative structure-cladding junctions that allow to better absorb the seismic action; in particular it has been examined the possibility to realize elements semi-independent from the supporting frame and capable to sup-

port displacements of the structure during seismic events. The proposed solution is based on an analysis of the state-of-the-art that has foreseen: regulatory framework; data collection on the damages suffered by the industrial buildings in the 2009-16 earthquakes; examination of existing precast systems and of the most widespread technological-constructive solutions for industrial buildings. In particular, we focused on the cladding system consisting of precast panels and related connections, analyzing the production processes (with visits to the factory and construction sites).

The classification of the panels on the market has allowed to evaluate the dimensions and the performances that must be satisfied, for example: easiness of realization; duration over time; impact resistance; safety regarding the type of planned

della loro elevata deformabilità e leggerezza, essi sono normalmente dimensionati a stato limite di esercizio piuttosto che a stato limite ultimo. In pratica, i limiti imposti sulle deformazioni negli stati limite di esercizio (finalizzati a limitare il danneggiamento degli elementi non strutturali e degli impianti), sono di solito più restrittivi dei limiti imposti sulle tensioni negli stati limite ultimi (finalizzati alla salvaguardia della vita e al controllo del collasso), anche se associati a terremoti meno intensi. Anche se può apparire paradossale, l'obiettivo di limitare il danneggiamento agli elementi non strutturali dell'edificio induce a progettare una struttura più robusta di quella necessaria a prevenirne il crollo. L'idea qui proposta è di progettare un sistema di tamponamento che sia in grado di sopportare grandi deformazioni angolari della struttura senza danni significativi e che, pertanto, consenta di ridurre il dimensionamento della struttura a quello minimo necessario per gli stati limite ultimi.

Per gli edifici industriali monopiano, la verifica degli stati limite di esercizio per le azioni orizzontali, consiste nel limitare la deformazione angolare della struttura. In particolare, tale deformazione è data dal rapporto tra lo spostamento orizzontale in sommità ( $\delta$ ) e l'altezza dell'edificio ( $h$ ) e, in assenza di carroponte, deve sempre risultare inferiore a 1/150 (§4.2.4.2.2 della NTC). Nel caso specifico di azioni orizzontali di natura sismica (§7.3.7.2), tale limite varia in funzione del tipo di tamponamento, essendo pari a 1/100 nel caso di «tamponamenti progettati in modo da non subire danni a seguito di spostamenti di interpiano, per effetto della loro deformabilità intrinseca ovvero dei collegamenti alla struttura».

Lo studio quindi è stato orientato a progettare un sistema di tamponamento che potesse sopportare una deformazione angolare

della struttura decisamente maggiore di quella normalmente richiesta per gli stati limite di esercizio per questo tipo di edifici, cioè pari a circa 1/33.

Il processo metodologico per l'individuazione della soluzione più funzionale ha come punto di partenza l'idea di realizzare un sistema di tamponamento capace di assecondare il movimento della struttura portante provocato dall'azione sismica. Alcune delle prime ipotesi proposte, si sono basate sull'impiego di sistemi in grado di rendere il pannello di tamponamento deformabile in caso di sisma.

Tali soluzioni sono state confrontate con i parametri ricavati dallo studio dello stato dell'arte, riscontrando diversi limiti tra i quali: la difficoltà di realizzazione in fabbrica, per il numero di elementi e la complessità del progetto; la non prevedibilità del funzionamento dei sistemi, soprattutto nel lungo periodo; l'incognita sul mantenimento delle prestazioni dopo un'eventuale sisma. Conseguentemente ci si è orientati su un diverso approccio al problema esaminando una seconda categoria di soluzioni nelle quali si è cercato di rendere indipendenti gli elementi di tamponamento dal telaio strutturale (Fig. 1 alcuni modelli di studio ad esse relativi). Nella soluzione scelta e sviluppata il pannello non è vincolato alla struttura, ma è libero di muoversi, oscillando lateralmente all'interno di guide metalliche grazie alla forma arrotondata del lato inferiore e superiore. L'ipotesi prevede la distribuzione di calcestruzzo e alleggerimenti nel pannello in modo da abbassarne il baricentro e favorire il ricentraggio dell'elemento di chiusura dopo le oscillazioni dovute ad un eventuale evento sismico. Per poter studiare il sistema dal punto di vista geometrico lo spostamento laterale del pannello prefabbricato è stato analizzato attraverso l'utilizzo del software CAD 3D Inventor. I risultati

work and possible break-ins; fire retention; safety; thermal and acoustic insulation; maintenance of the basic characteristics after the earthquake. In particular, the study focused on the systems for steel single-storey industrial buildings. The interest in this type of buildings comes from the observation that they are normally sized to the serviceability limit state of rather than the ultimate limit state, due to their high deformability and lightness. In practice, for these type of buildings the limits imposed on deformations in the serviceability limit states (aimed at limiting the damage to non-structural elements and plants) results to be more restrictive than those imposed in the ultimate limit states (aimed at safeguarding of life and control of collapse), even if associated with less intense earthquakes. Although it may seem strange, the target of limiting the

damage to non-structural elements leads to design a more stiff and heavy structure than necessary to prevent the collapse. The idea proposed is to design a system able to bear large angular deformations of the structure without significant damages and to reduce the size of the structure to the minimum required for the ultimate limit states.

For single-level industrial buildings, the control of the serviceability limit states for horizontal actions consists in limiting the angular deformation (drift) of the structure. In particular, this deformation is given by the ratio between the horizontal displacement at the top ( $\delta$ ) and the height of the building ( $h$ ) and, in absence of a crane, it must always be less than 1/150 (§4.2.4.2.2 of the NTC). In the specific case of horizontal seismic actions (§7.3.7.2), this limit changes according to the type of cladding, being equal to 1/100 in the

case of cladding designed «not to be damaged for inter-storey movements, due to their intrinsic deformability or connections to the structure».

The study led therefore to design a cladding system capable to bear a drift of the structure greater than that normally required for the serviceability limit states for this type of buildings (1/33 versus 1/150), without getting damaged.

For the identification of the most functional solution, the methodological process started from the idea of creating a system able to support the horizontal movement of the bearing structure caused by the seismic action. Some of the first hypotheses were based on the design of systems able to make deformable the panel in case of an earthquake.

These solutions have been compared with a set of parameters obtained from the study of the state-of-the-art, finding different limits including: the difficulty

of realization in factory for the number of elements and the complexity of the project; the unpredictability of the functioning of the systems, especially in the long term; the uncertainty of maintaining the performances after an eventual earthquake. Consequently, we focused on a different approach, by examining a second category of solutions in which we tried to make the elements independent from the structural frame (Fig. 1).

In the developed solution the panel is not bound to the structure but it is free to move in its plane, oscillating laterally inside metal guides thanks to the rounded shape of the lower and upper side. The hypothesis foresees the distribution of concrete and lightening in the panel in order to lower its center of gravity and favor the re-centering of the cladding element after the oscillations due to a possible seismic event. In order



hanno permesso il dimensionamento ottimale dell'elemento di tamponamento e l'analisi delle interazioni possibili tra i diversi componenti edilizi durante il movimento laterale.

Il pannello proposto presenta una stratigrafia molto simile a quella dei pannelli a taglio termico oggi più diffusamente in uso, ma si differenzia da questi per la particolare disposizione dell'alleggerimento posto solo nella parte superiore. La forma del

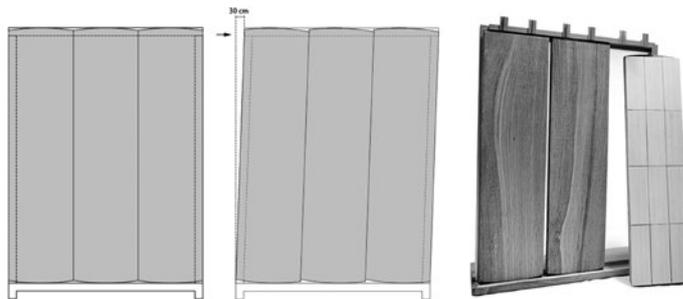
to study the system from a geometrical point of view, the lateral movement of the precast panel has been analyzed through the use of the 3D CAD software *Inventor*. The results allowed the optimal sizing of the elements and the analysis of the possible interactions between the different building components during the lateral movement.

The proposed panel presents a stratigraphy very similar to that of the thermal break panels today more widely used, but it differs from these due to the particular arrangement of the lightening placed in the upper part only. The shape of the panel, with base and semi-circular top, allows to move itself freely shifting in its plane of about 0.30 m on 10 m of height (Fig. 2).

The construction system that links the panels with the structure, has been conceived to allow the complete in-plane independence of the cladding

from the supporting system. The panel is placed, both above and below, in two "U" shaped guides that guarantee its in-plane movement but prevent its overturning. The two joints have been studied with commercial profiles (Fig. 3). Special solutions are provided at the panel-structure joint (based on the use of semi-spherical elements and spring systems placed in pockets provided in the panels) and panel-panel joints (based on male-female connections that limit the contact surfaces) to decrease the friction between the different elements and make possible the mutual sliding of the parts during the earthquake (Fig. 4).

In the event of an earthquake, the designed construction system is able to guarantee a higher degree of resilience than similar existing systems. Thanks to the lowered position of the center of gravity, after an earthquake the panel is



pannello, con base e sommità semicircolare, permette a quest'ultimo di muoversi liberamente spostandosi nel proprio piano di circa 0.30 m su 10 m di altezza (Fig. 2). Il sistema costruttivo che collega i pannelli con la struttura è pertanto concepito in modo tale da permettere la completa autonomia del tamponamento rispetto al sistema portante. Il pannello per potersi muovere è alloggiato, sia superiormente che inferiormente, in due guide a forma di "U" che garantiscono al sistema di tamponamento di scorrere ma evitano il ribaltamento fuori piano. I due giunti sono stati studiati con profili commerciali (Fig. 3).

Sono previsti particolari soluzioni in corrispondenza del giunto pannello-struttura (basate sull'impiego di elementi semisferici e sistemi a molla in tasche predisposte nei pannelli) e pannello-pannello (basate su giunti maschio-femmina che limitano le superfici di contatto) per diminuire l'attrito tra i diversi elementi e rendere possibile il mutuo scorrimento delle parti in fase di sisma (Fig. 4).

Il sistema costruttivo progettato dovrebbe poter così garantire, in caso di terremoto, un grado di resilienza superiore a quelli di analoghi sistemi esistenti, permettendo un movimento utile a non compromettere gli elementi portanti di chiusura e i loro giunti. Dopo il sisma, il pannello, grazie alla posizione ribassata del baricentro, dovrebbe essere in grado di riportarsi nel suo punto di equilibrio senza causare danni a cose o persone. Lo stu-

able to return to its equilibrium point without causing damage to things or people.

The study of feasibility of the system is not based only on the data obtained through the CAD software. First calculation checks have been carried out to size the profiles and to assess the technological feasibility of the proposed solution.

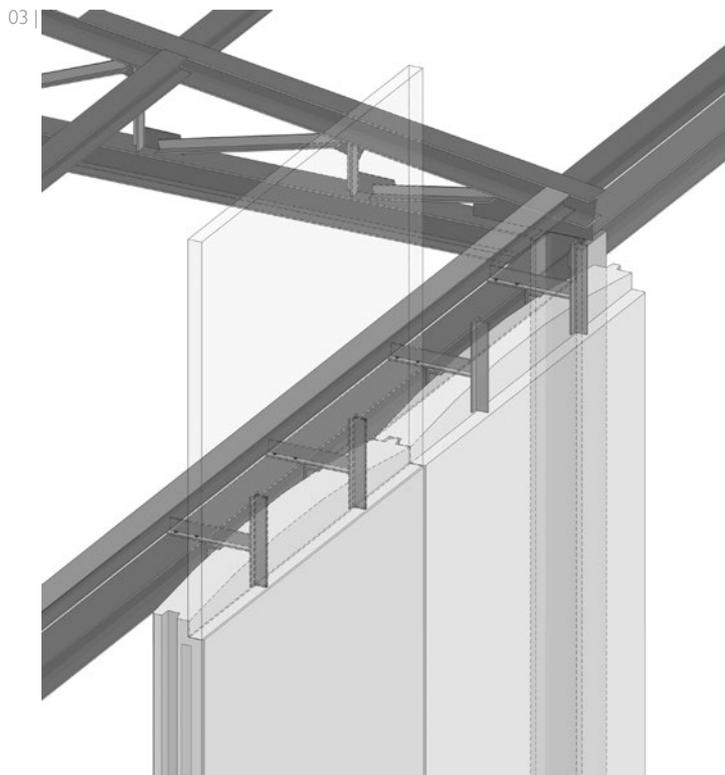
The production, moving and transport processes of the designed system are similar to those of traditional precast panels. The construction of the concrete element can be done at the factory inside a shaped formwork on the sides. The execution of the joints can take place in the workshop, therefore no particularly complex operations are necessary during the installation on site. To guarantee the optimal working of the system, an angular closing element has been designed, consisting of

an insulated metal carter able to compress during the oscillations. For this reason, it is expected its replacement after an earthquake.

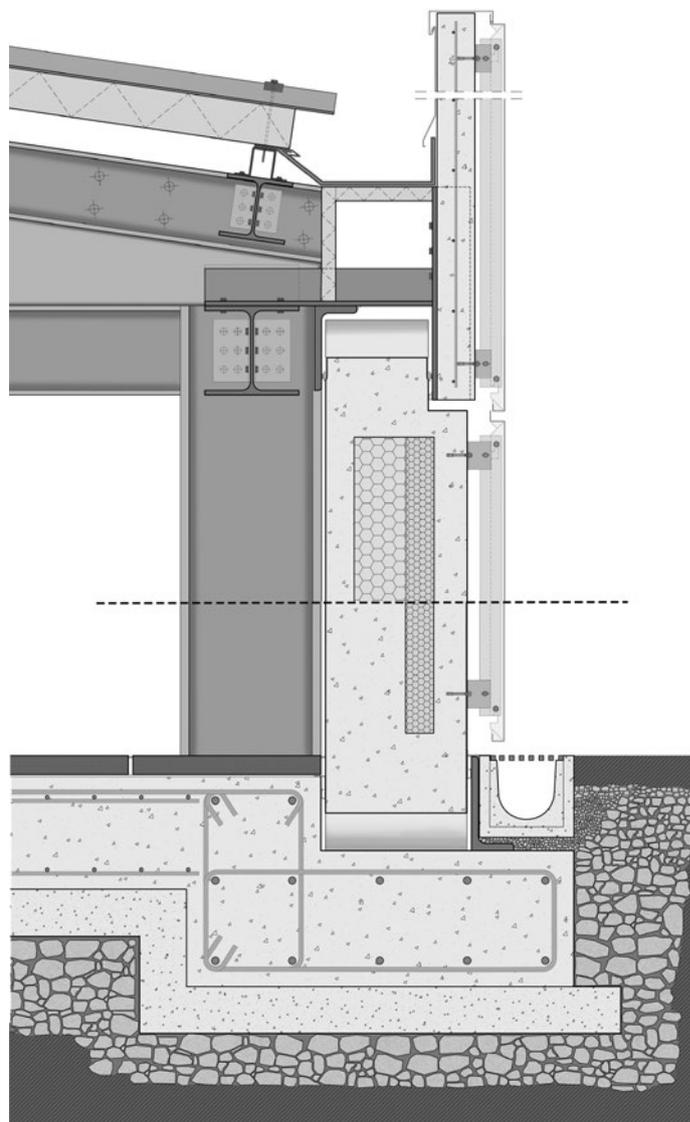
The types of coating for the precast system have been studied in order to improve the aesthetic quality of the industrial building and above all in order to limit the damages during the seismic events. For this reason, each precast panel is designed with its own independent coating that, during an earthquake, follows the movement of the panel which it is anchored to. This is a limit that could have aesthetic effects. The study has been carried out by imagining solutions with different materials; actually, it shows that the problem can be overcome easily by marking the joints of the elements that constitute the covering to make the vertical joint indistinguishable between the different panels (Fig. 5-7).

dio di fattibilità del sistema nel suo complesso non si basa soltanto sui dati ricavati attraverso il software CAD. Conseguentemente alla definizione dei giunti sono state svolte prime verifiche di calcolo con il dimensionamento dei profili e sono state condotte verifiche in merito alla fattibilità tecnologica attraverso una definizione di dettaglio della soluzione proposta.

I processi di produzione, movimentazione e trasporto che si possono prevedere per il sistema di tamponamento progettato sono analoghi a quelli dei pannelli prefabbricati tradizionali. La realizzazione dell'elemento in calcestruzzo può avvenire in fabbrica all'interno di una cassaforma sagomata ai lati. L'esecuzione dei giunti può avvenire in officina, pertanto non sono necessarie operazioni particolarmente complesse durante la messa in opera in cantiere. Per garantire il funzionamento ottimale del sistema è stato progettato un elemento di chiusura ad angolo, consistente in un carter metallico coibentato capace di comprimersi durante le oscillazioni. Per questo motivo è prevista la sua sostituzione in seguito ad un possibile evento sismico. Le tipologie di rivestimento per il sistema di tamponamento prefabbricato sono state studiate al fine di migliorare la qualità estetica del manufatto industriale e soprattutto in modo da limitare i danni durante eventi sismici. Per questa ragione ogni pannello prefabbricato è pensato con un proprio rivestimento



indipendente che, durante un terremoto, segue il movimento del pannello al quale è ancorato. Si tratta di un limite che potrebbe avere effetti estetici; lo studio effettuato immaginando soluzioni con differenti materiali mostra, in realtà, che il problema è superabile facilmente marcando le fughe degli elementi che costituiscono il rivestimento così da rendere indistinguibile il giunto verticale tra i diversi pannelli (Figg. 5, 6, 7). Si è verificato, inoltre, che fosse possibile garantire la realizzazione delle necessarie bucaure, portali di ingresso e punti di carico, compatibilmente con la flessibilità di involucro richiesta dal sistema studiato. Sono state svolte infine verifiche di dimensionamento su due sistemi di telai differenti, uno a nodi rigidi e l'altro incer-



05 | Render di progetto che mostrano diverse soluzioni di involucro

*Project rendering showing different housing solutions*

06 | Render di progetto che mostrano diverse soluzioni di involucro

*Project rendering showing different housing solutions*



| 05



| 06

nierato con controventi, riscontrando come, in entrambi i casi, con l'utilizzo del nuovo sistema, dimensionando correttamente l'edificio, si possa ottenere una diminuzione dell'uso di acciaio pari a circa il 10%.

### Conclusioni

Lo studio sinteticamente riportato non rappresenta evidentemente che un'ipotesi di lavoro da approfondire, in successive ricerche, con verifiche di calcolo e di laboratorio; tuttavia segna una strada che sembra promettente.

In sintesi, la riduzione dei danni ai tamponamenti in caso di un evento sismico potrà incidere sui tre pilastri della sostenibilità nella produzione degli edifici industriali:

- sostenibilità sociale: riducendo le interruzioni complete o parziali delle attività industriali, limitando le perdite in termini di posti di lavoro o, in casi estremi, la perdita di vite umane;
- sostenibilità economica: limitando le perdite economiche associate ai danni materiali agli impianti e alle attrezzature e quelle associate alle interruzioni di produzione;
- sostenibilità ambientale: limitando la produzione di rifiuti da demolizione/costruzione e l'impiego di risorse per la sostituzione; inoltre, l'eventuale riduzione delle strutture associate

ad una migliore strategia di progettazione, può ridurre ulteriormente l'impiego di materiali ad alta energia incorporata (acciaio).

La disponibilità di soluzioni tecnologiche finalizzate alla riduzione dei danni agli elementi non strutturali degli edifici, quali i tamponamenti, potrebbe inoltre avere delle ricadute anche in relazione ai contenuti della normativa tecnica in materia, con conseguenze legate in particolar modo alla possibilità di raggiungere migliori risultati in termini di ottimizzazione strutturale.



## REFERENCES

- Ance/Cresme (2012), "Primo Rapporto. Lo stato del territorio italiano 2012. Insediamento e rischio sismico e idrogeologico", available at: [http://www.camera.it/temiap/temi16/CRESME\\_rischiosismico.pdf](http://www.camera.it/temiap/temi16/CRESME_rischiosismico.pdf) (accessed 18 October 2017).
- Ercolino, M., Magliulo, G. and Manfredi, G. (2016), "Failure of a precast RC building due to Emilia-Romagna earthquakes", *Engineering Structures*, Vol. 118, pp. 262-273.
- Liberatore, L., Sorrentino, L., Liberatore, D. and Decanini L.D. (2013), "Failure of industrial structures induced by the Emilia (Italy) 2012 earthquakes", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 34, pp. 629-647.
- Gruppo di Lavoro Agibilità Sismica dei Capannoni Industriali (2012), "Linee di indirizzo per interventi locali e globali su edifici industriali monopiano non progettati con criteri antisismici", available at: [http://www.reluis.it/images/stories/Linee\\_di\\_indirizzo\\_GDL\\_Capannoni.pdf](http://www.reluis.it/images/stories/Linee_di_indirizzo_GDL_Capannoni.pdf) (accessed 7 November 2017).
- Belleri, A., Bellotti, D., Nascimbene, R. and Riva, P. (2013), "Vulnerabilità riscontrate negli edifici industriali colpiti dal sisma del maggio 2012", available at: <http://www.ingenio-web.it/immagini/Articoli/PDF/iRFkgscc5o.pdf> (accessed 1 November 2017).
- ReLUISS-Assobeton (2007), "Strutture prefabbricate – Schedario dei collegamenti", available at: <http://www.reluis.it/images/stories/Schedario%20collegamenti%20in%20strutture%20prefabbricate.pdf> (accessed 7 November 2017).
- ReLUISS-Assobeton (2008), "Strutture prefabbricate – Catalogo delle tipologie esistenti", available at: <http://www.reluis.it/images/stories/Catalogo%20tipologie%20strutture%20prefabbricate.pdf> (accessed 7 November 2017).
- ReLUISS-Assobeton (2008), "Strutture prefabbricate – Schedario di edifici prefabbricati in c.a.", available at: <http://www.reluis.it/images/stories/Schedario%20edifici%20prefabbricati%20in%20ca.pdf> (accessed 7 November 2017).
- Fisher, M. (2004), *Industrial Buildings. Roofs to Anchor Rods*, American Institute of Steel Construction, USA.
- The Steel Construction Institute, SCI (2008), *Best Practice in Steel Construction - Industrial Building*, SCI, European Commission's Research Fund for Coal and Steel.
- Lamarche, C.-P., Proulx, J., Paultre, P., Turek, M., Ventura, C.E., Le, T. P. and Lévesque, C. (2009), "Toward a better understanding of the dynamic characteristics of single-storey braced steel frame buildings in Canada", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 36, No. 6, pp. 969-979.
- Saatcioglu, M., Tremblay, R., Mitchell, D., Ghobarah, A., Palermo D., Simpson R., Adebar P., Ventura and C., Hong H. (2013), "Performance of steel buildings and nonstructural elements during the 27 February 2010 Maule (Chile) Earthquake", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 40, pp. 722-734.
- Tremblay, R., Mitchell, D. and Tinawi, R. (2013), "Damage to industrial structures due to the 27 February 2010 Chile earthquake", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 40, pp. 735-749.
- Bournas, D.A., Negro, P. and Taucer, F.F. (2014). "Performance of industrial buildings during the Emilia earthquakes in Northern Italy and recommendations for their strengthening", *Bulletin of Earthquake Engineering*, pp. 2383-2404.

Moreover, we have verified that it is possible to guarantee the realization of the necessary openings, entrance portals and load points, in according with the flexibility of the cladding required by the studied system. Lastly, we carried out structural checks on two different frame systems, moment resisting frame and braced frame. We have found that, in both cases, the use of the new system, allows a reduction in steel use of around 10%.

## Conclusions

The study briefly reported presents a work hypothesis to be explored in further researches, with calculation and laboratory tests. However, it marks a road that looks promising. Shortly, the reduction of damage to cladding systems in case of seismic events will influence on three pillars of sustainability in the production of industrial buildings:

- social sustainability: reducing the complete or partial interruptions of industrial activities, limiting losses in terms of jobs or, in extreme cases, loss of human life;
- economic sustainability: limiting the economic losses associated with damages to plants and equipments and those associated with production interruptions;
- environmental sustainability: limiting the production of demolition / construction rubbish and the use of resources for the replacement; furthermore, the possible reduction of the structures associated with a better planning strategy can further reduce the use of high-energy materials (steel).

The availability of technological solutions aimed at reducing the damages to non-structural elements of buildings, such as cladding, could also have

repercussions also in relation to the contents of the technical legislation on the subject, with consequences particularly linked to the possibility of achieving better results in terms of structural optimization.