Nidyon: Strutture Antisismiche con Pannelli Portanti in Polistirene

Studi scientifici al servizio della progettazione e della qualità del costruito

Autore

Dott. Ing. Daniele Malavolta, Libero Professionista, Consulente Tecnico di Nidyon S. r. l.

NIDYON
TECNOLOGIA PER COSTRUIRE
www.nidyon.com

Data: 16-09-2014

1 Introduzione

Nell'universo delle costruzioni in calcestruzzo armato gettato in opera, i sistemi strutturali più comunemente utilizzati sono quelli a telaio, a setti portanti o una combinazione di entrambi. A partire dagli anni '60, numerosissimi sono stati gli studi relativamente al comportamento sismico di strutture in c.a. a telaio.
Lo stesso si può affermare per le costruzioni costituite da pareti miste a telai. In particolare, l'argomento della progettazione sismica di tali tipologie di edifici ha sempre riguardato soprattutto gli edifici alti nei quali, chiaramente, l'impiego delle pareti avveniva allo scopo di limitarne la elevata deformabilità [1].
Di contro, il comportamento sismico di strutture realizzate interamente a pareti portanti in c.a. è stato meno studiato negli anni, nonostante si sia osservato [2, 3] che edifici realizzati mediante tali sistemi strutturali abbiano mostrato, in generale, pregevoli risorse di resistenza nei confronti di terremoti anche di elevata intensità.
A tale proposito, negli ultimi dieci anni l'ingegneria sismica si sta incentrando sull'approfondimento delle risorse di queste tipologie costruttive, di cui si è sempre fatto largo uso in passato (tipicamente nei paesi dell'Europa continentale, in America latina, negli USA, ma anche in Italia), ma sulle quali mancano adeguate conoscenze scientifiche relativamente al loro comportamento in zona sismica. Tali tipologie riguardano sostanzialmente sistemi strutturali industrializzati interamente costituiti da pareti portanti in c.a. per edifici di modesta altezza, usualmente utilizzati in un'edilizia caratterizzata da ridotti costi di realizzazione (abitazioni civili e/o uffici) [4].
In questo contesto, l'azienda NIDYON, all'inizio degli anni 2000, ha fatto da apripista, promuovendo campagne di studio scientifico e sperimentale, affidate a enti di ricerca Universitari, allo scopo di identificare e migliorare il comportamento delle strutture realizzate mediante il proprio sistema costruttivo nei confronti delle azioni sismiche.
Il presente articolo riassume e commenta alcuni significativi risultati messi in evidenza dagli studi suddetti, che hanno riguardato l'esecuzione e la successiva interpretazione di prove sperimentali relative a pareti portanti costituite da due lastre esterne in calcestruzzo (di spessore pari a circa 4 cm) gettate su entrambe le facce di un pannello di alleggerimento in polistirolo opportunamente sagomato. Tale procedimento costruttivo, denominato NIDYON dal nome della ditta produttrice di Santarcangelo di Romagna (RN), prevede la realizzazione di pannelli utilizzando come materiale di base blocchi stampati di polistirene espanso (di spessore variabile) e reti elettrosaldate. Si tratta di pannelli caratterizzati da notevole leggerezza e maneggevolezza, anche di lunghezze notevoli, che sono completati in cantiere mediante getto delle due lastre in calcestruzzo. Tale metodo costruttivo garantisce agli edifici alti requisiti termoacustici e prestazioni antisismiche superiori a quelle raggiungibili mediante i procedimenti costruttivi tradizionali.

2 La tecnica costruttiva

NIDYON è una tecnologia industrializzata basata sulla produzione (in stabilimento) e sull'utilizzo (in cantiere) di pannelli modulari in polistirene espanso completati in opera con l'applicazione di calcestruzzo. In estrema sintesi, si tratta di costruzioni a pareti portanti in calcestruzzo debolmente armato gettato in opera le quali, nello specifico,

possono essere realizzate impiegando due differenti tipologie di pannelli, a seconda delle esigenze:

1. Il sistema **Nidyon NYD** ("Pannello doppio"), che utilizza casseri a perdere pre-armati per la realizzazione di pareti *tradizionali* e solai coibentati in c.a.;
2. Il sistema **Nidyon NYSP** (Pannello Singolo Portante), il quale, in maniera analoga, prevede l'impiego di pannelli modulari pre-armati per la realizzazione di pareti *sandwich* e solai coibentati in c.a.;

Gli elementi strutturali oggetto della campagna di prove descritta nel presente articolo sono stati realizzati secondo la tecnica costruttiva NIDYON NYSP, poiché si trattava del prodotto più innovativo e, in assoluto, il meno studiato nella letteratura scientifica disponibile.

Ciascuna parete si compone di due lastre esterne in calcestruzzo armato gettato in opera dello spessore di 40 mm e di uno strato centrale in polistirene espanso di spessore variabile (Figura 1 (a) e (b)). Le due lastre in conglomerato cementizio sono armate ciascuna mediante una rete elettrosaldata composta da fili di diametro 2.5 mm a maglia stretta (5x5cm), collegate tra loro attraverso dei connettori metallici (disposti in quantità circa pari a 40 ÷ 50 al m2). Lo strato centrale in polistirene espanso, caratterizzato da un profilo a onda in direzione orizzontale, garantisce elevati requisiti termoacustici. In virtù della loro tecnologia costruttiva, tali elementi verranno in seguito indicati come pareti "sandwich".

La sequenza realizzativa dei pannelli può essere schematizzata come segue:

- lo strato centrale in polistirene espanso viene sagomato in stabilimento ed è completato con due reti elettrosaldate disposte sulle due facce opposte del pannello, collegate tra loro mediante connettori metallici; tipicamente, le reti elettrosaldate e i connettori metallici sono ottenuti a partire da un acciaio in bobine di caratteristiche analoghe al B450 C;
- il pannello, una volta in opera, viene completato mediante l'inserimento di eventuali armature aggiuntive, derivanti dal calcolo strutturale; infine, viene effettuato il getto di due lastre di calcestruzzo a inerti fini (con diametro massimo degli inerti pari a 6 mm) tipicamente di classe C25/30.

In seguito all'indurimento del calcestruzzo, la struttura ottenuta è una parete portante a sandwich in conglomerato cementizio armato con armatura diffusa orizzontale e verticale.

Le connessioni fra le pareti portanti ortogonali (collegamenti "parete-parete"), così come quelle fra pareti e solai, sono realizzate attraverso la messa a punto di particolari costruttivi tali da garantire il comportamento scatolare del sistema strutturale, senza dare luogo a plasticizzazioni in tali zone (qui di seguito definite con il nome di "chiavi elastiche"). Di conseguenza, ciascuna parete si fa' carico delle azioni orizzontali agenti parallelamente al proprio piano. È opportuno notare come il sistema strutturale sia caratterizzato (i) dall'inserimento di una quantità di armature orizzontali relativamente elevata, al fine di scongiurare una possibile rottura fragile di tipo tagliante, e (ii) da una rigida limitazione sulla massima tensione verticale nel calcestruzzo (che si traduce nel

realizzare strutture fino ad un massimo di tre piani fuori terra[1]), allo scopo di favorire una rottura dei pannelli di tipo duttile, ossia di tipo flessionale e sbilanciata lato acciaio. Le armature "standard" usualmente previste negli impieghi più comuni conducono a modeste percentuali di armatura; ciò consente di classificare tali pannelli, in accordo con l'Eurocodice, come "concrete structures with small amount of reinforcement" o "large lightly reinforced concrete walls" (LLRCW).

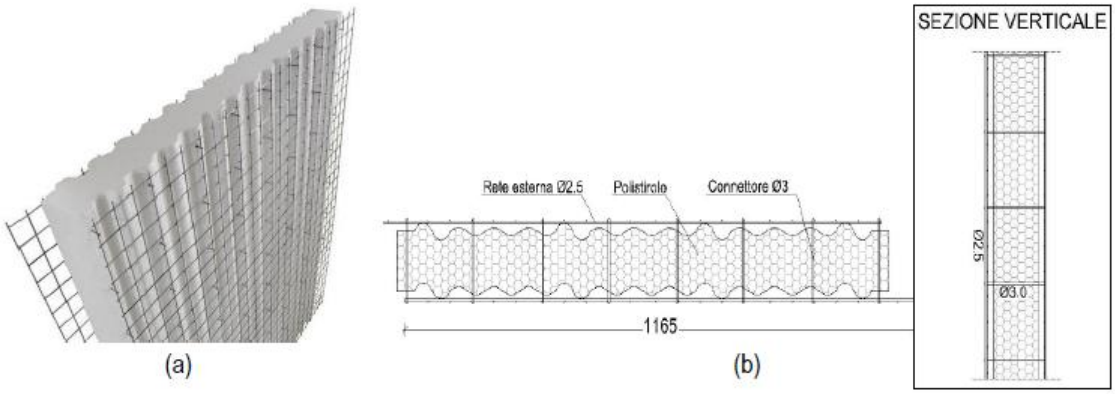

Figura 1. (a) Strato in polistirene espanso con le due reti elettrosaldate collegate mediante i connettori metallici e (b) pianta e sezione verticale del pannello sandwich.

3 Sintesi delle sperimentazioni effettuate

3.1 Le prove volte a identificare il comportamento statico

3.1.1 Generalità

La caratterizzazione del comportamento strutturale dei pannelli in condizioni statiche è stata condotta svolgendo quattro tipologie di prove: a scorrimento delle due lastre in c.a., di compressione diagonale, con carico assiale e a flessione fuori dal piano della parete.

Nelle varie tipologie di prove sono stati utilizzati pannelli con sezione trasversale e lunghezza variabili; in particolare, i pannelli provati hanno tutti una larghezza di 1120 mm ed uno spessore complessivo variabile fra a 140 e 290 mm. Lo spessore medio delle due lastre in c.a. è pari a 40 mm, mentre lo spessore medio del pannello interno ondulato in polistirene espanso è variabile fra 60 e 200 mm (vedi Figura 2).

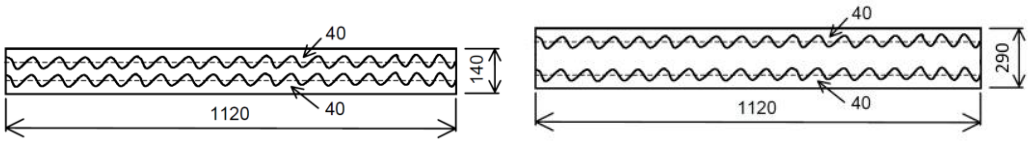

Figura 2. Sezione dei pannelli impiegati nelle prove in condizioni statiche.

Le prove suddette e la conseguente interpretazione analitica sono state condotte, nel periodo compreso fra gli anni 2001-2008, presso il Laboratorio Prove Strutture dell'Università di Bologna (Responsabile: Prof. Ing. Marco Savoia), sotto il coordinamento

[1] Per progetti che prevedano un numero di piani superiore a 3, l'Azienda consiglia di impiegare per gli impalcati inferiori il pannello Doppio NYD, mentre il pannello Singolo Portante verrebbe previsto per realizzare gli ultimi 3 piani.

scientifico del Prof. Ing. Claudio Ceccoli, con la collaborazione del Prof. Ing. Tomaso Trombetti e del Dott. Ing. Gilberto Dallavalle.

3.1.2 Prove a Scorrimento

Scopo delle presenti prove era di identificare, al variare dello spessore dei pannelli, i valori di massimo sforzo di taglio fuori dal piano oltre il quale le pareti superano il loro limite elastico a causa dello scorrimento relativo fra le lastre in c.a. I test sono stati eseguiti

- nel Dicembre 2001, su tre pareti Nidyon NYSP di dimensioni pari a 150x112cm ed uno spessore complessivo di 14 cm (4+6+4cm, pareti n. 1, 2 e 3);
- nell'Ottobre 2008, su 4 pareti di analoghe dimensioni, ma con uno spessore complessivo di 27 cm (4.5+18+4.5cm, pareti n. 4 e 5) e 29 cm (4.5+20+4.5cm, pareti n. 6 e 7).

Le prove sono state condotte fissando la lastra inferiore di calcestruzzo al piano orizzontale di un telaio rigido ed applicando un carico orizzontale in corrispondenza della lastra superiore mediante martinetti idraulici (secondo gli schemi riportati in figura 3). Ogni parete è stata sottoposta a cicli di carico e scarico di ampiezza massima crescente fino a raggiungere la rottura per scorrimento relativo fra i due strati di calcestruzzo. Il carico è stato applicato in direzione ortogonale alla direzione di ondulazione dell'EPS (figura 4).

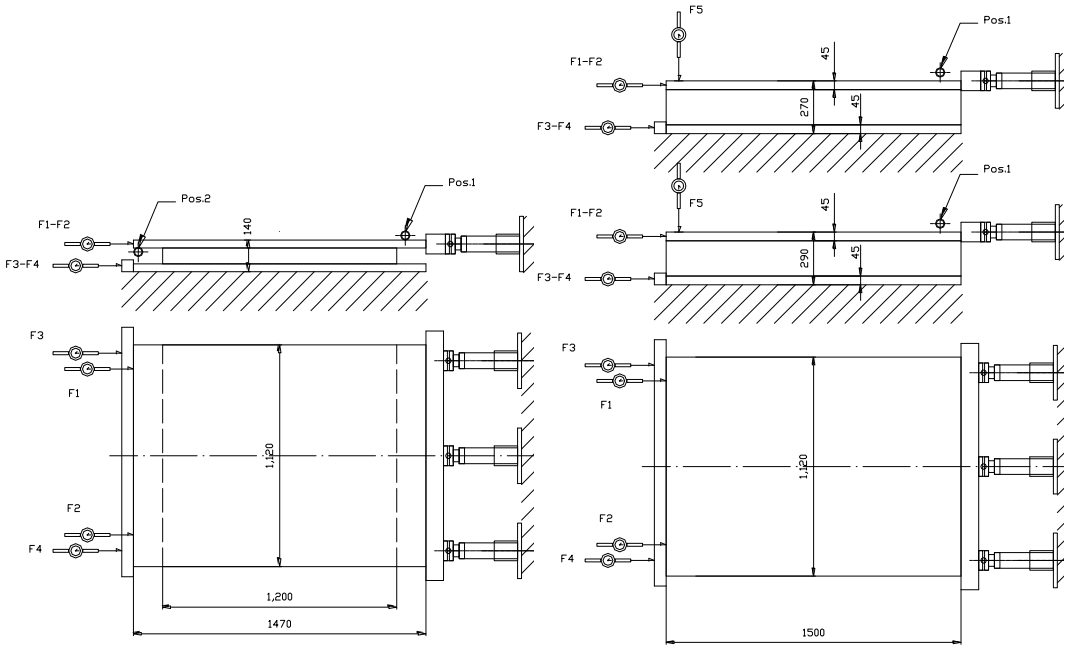

Figura 3. Schema di prova (a) delle pareti n. 1, 2 e 3 e (b) delle pareti 4, 5, 6 e 7.

L'interpretazione dei risultati delle prove sperimentali di scorrimento condotte ha consentito di valutare:

- le tensioni tangenziali elastiche e di rottura che agiscono nella sezione di interfaccia fra lo strato di calcestruzzo e lo strato centrale in EPS;
- la rigidezza elastica degli elementi provati;
- la rigidezza elastica di elementi caratterizzati da spessori di EPS differenti da quelli provati (compresi fra 6 e 18 cm).

I valori ottenuti risultano pienamente accettabili, tenuto conto che le pareti in esame vengono impiegate all'interno di strutture a comportamento scatolare da cui discendono azioni orizzontali agenti prevalentemente nel piano delle pareti stesse.

Figura 4. Sistema di prova utilizzato per le 7 prove a scorrimento.

3.1.3 Prove a compressione diagonale

Scopo delle presenti prove era di stabilire come il metodo di verifica a taglio previsto dalle vigenti Norme Tecniche per le sezioni piene in c.a. fosse sostanzialmente applicabile anche alle strutture a pareti sandwich Nidyon NYSP sollecitate nel piano.
I test sono stati eseguiti, nel Gennaio 2002, su 3 pareti sandwich Nidyon NYSP di dimensioni 112x112 cm e di spessore complessivo pari a 14 cm (ovvero 4+6+4cm).
I campioni sono stati sagomati in modo da ottenere due basi piane di appoggio. Successivamente, sono stati disposti con le basi di appoggio a contatto con i piatti della pressa utilizzata per applicare il carico, secondo lo schema della figura 5 di seguito riportata. I campioni sono stati orientati in modo da ottenere un'applicazione del carico secondo un'inclinazione di 45° rispetto ai lati. Ogni parete è stata sottoposta a cicli di carico e scarico di ampiezza massima crescente fino a raggiungere il carico di rottura (figura 6).
Dalle prove effettuate è emerso che

- le formule predittive (di cui al cap. 4.1.2.1.3.2 del DM 14/01/2008, valide per le sezioni piene in c.a. [5]) mostrano di essere in grado di cogliere il comportamento delle pareti sandwich soggette a sforzo normale e taglio nel piano;
- conseguentemente, l'assunzione secondo la quale si sono considerate le due lastre in c.a. collaboranti al punto da poter considerare il sandwich come un'unica parete monolitica di spessore complessivo pari alla somma degli spessori delle due lastre (4+4 cm), viene di fatto confermata dal risultato di prova;
- ciò consente di dedurre la sostanziale applicabilità del metodo di verifica a taglio nel piano previsto dal D.M. 14/01/2008 anche per le strutture a pareti sandwich realizzate secondo il metodo costruttivo Nidyon NYSP.

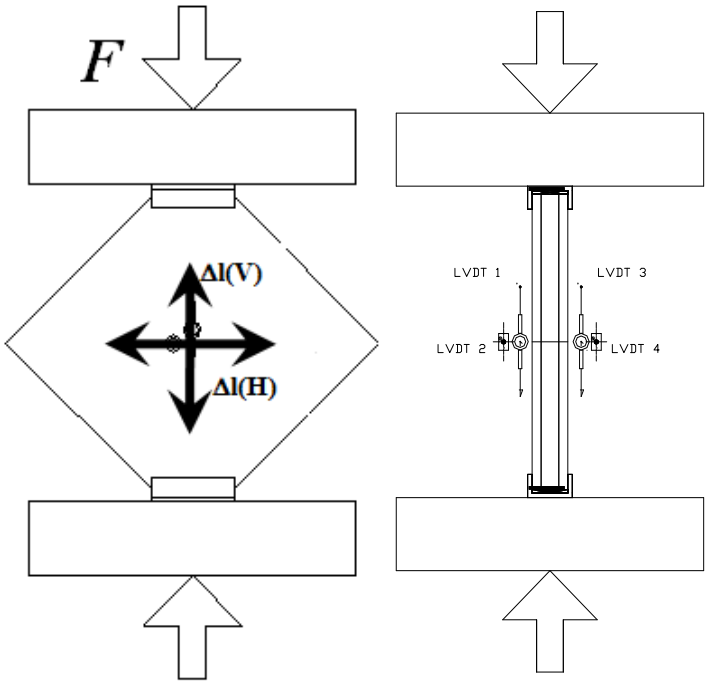

Figura 5. Sistema di prova utilizzato per le prove a compressione diagonale.

Figura 6. Vista del sistema sperimentale impiegato per le 3 prove a compressione diagonale.

3.1.4 Prove a carico assiale centrato ed eccentrico

Scopo delle presenti prove era di indagare la capacità di resistenza dei pannelli soggetti a carichi verticali in conformità con lo spirito delle indicazioni normative sui pannelli sandwich [6], ed in particolare delle Norme CNR sui pannelli gettati in opera, che evi-

denziano la necessità di analizzare il comportamento degli elementi compressi in presenza di imperfezioni geometriche [7].
I test sono stati eseguiti, nell'Aprile 2002, su 8 pareti sandwich Nidyon NYSP di dimensioni pari a 112x290 cm, di spessore complessivo pari a 14 cm (ovvero 4+6+4cm). Alle estremità (superiore ed inferiore) delle pareti sono stati realizzati due cordoli in c.a. di sezione 14x20 cm.
Le prove sono state condotte con sforzo assiale crescente secondo lo schema statico riportato nella figura 7, di seguito riportata.
La forza di compressione è stata applicata alle pareti imponendo differenti valori di eccentricità (e = 0 , e = 25 ed e = 50 mm). Tali valori di eccentricità sono stati individuati con riferimento a quanto indicato dalle già citate Norme CNR sui pannelli gettati in opera [7].
Le pareti provate hanno manifestato resistenze considerevoli (variabili fra 1429 kN per i campioni con eccentricità e = 0, fino a 846 kN per quelli con e = 50 mm), ampiamente compatibili con i carichi cui normalmente sono sottoposte (edifici fino a 3 piani), mostrando però una certa sensibilità nei confronti delle azioni assiali con eccentricità più elevate. Per questa ragione l'Azienda Nidyon ha sviluppato alcune semplici indicazioni per consentire ai progettisti di effettuare le verifiche sotto carico assiale tenendo conto delle effettive eccentricità geometriche dei carichi, ivi comprese quelle dovute ad eventuali imprecisioni di posa dei pannelli e all'indeterminazione del piano meccanico medio, oltre alle eccentricità conseguenti alle azioni esterne generate dal sisma (esisma) o dal vento (evento).

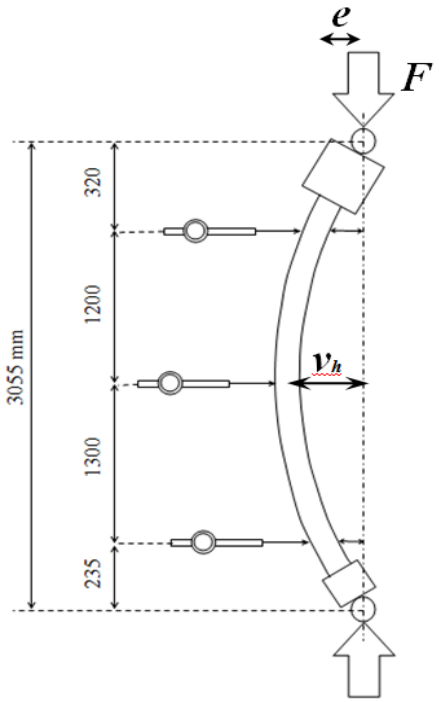

Figura 7. Schema statico.

Figura 8. Vista del sistema sperimentale impiegato per le 8 prove a compressione centrata ed eccentrica.

3.1.5 Prove a flessione fuori dal piano

Scopo delle presenti prove era di verificare se le formule semplificate messe a punto a scopo progettuale (verifiche locali di instabilità) fossero in grado di identificare in maniera sufficientemente cautelativa le resistenze ultime a flessione e taglio fuori dal piano delle pareti.
I test sono stati eseguiti, nel Novembre 2002, su 2 pareti sandwich Nidyon NYSP di dimensioni pari a 112x290 cm, di spessore complessivo rispettivamente pari a 14 cm (ovvero 4+6+4cm) e 18 cm (ovvero 4+10+4cm).
Lo schema statico è quello di "trave" su due appoggi. Il carico applicato è stato applicato in modo crescente in due punti posizionati ad una distanza di circa 1 m dagli appoggi (figure 9 e 10).
Le pareti provate hanno manifestato resistenze considerevoli (corrispondenti a circa 400 daN/mq) evidenziando, tuttavia, un comportamento di tipo non lineare oltre certi livelli di carico. In generale, dalle prove effettuate è emerso come le resistenze teoriche, determinate sulla base delle formule predittive messe a punto dall'Azienda, forniscano valori sensibilmente inferiori rispetto alle resistenze sperimentali ottenute. Ciò significa che tali formule possono essere utilizzate, ad esempio, per la verifica della resistenza a flessione fuori dal piano nei confronti di azioni sismiche o del vento, avendo cura di mantenersi sempre nel campo di comportamento di tipo elastico-lineare.

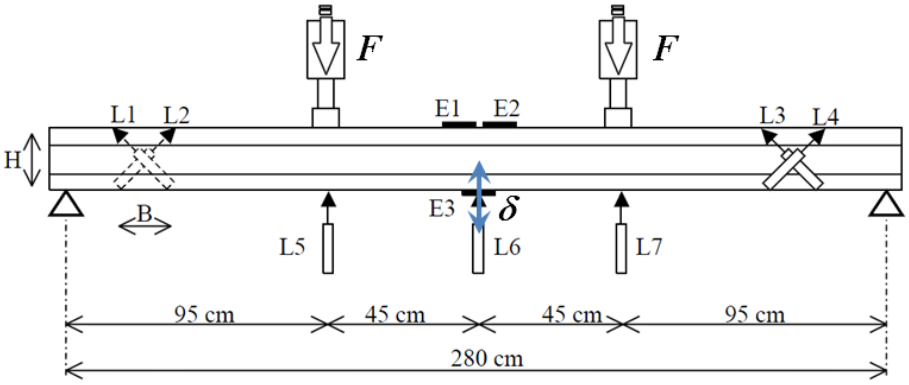

Figura 9. Schema di prova.

Figura 10. Vista del sistema sperimentale impiegato per le 2 prove a flessione fuori dal piano.

3.2 Le prove volte a identificare il comportamento sismico

3.2.1 Generalità

La caratterizzazione del comportamento strutturale delle pareti sandwich in condizioni sismiche è stata condotta svolgendo due differenti tipologie di studio scientifico e sperimentale:

- una campagna di prove su singoli pannelli o di assemblaggi degli stessi, portati a rottura mediante azioni orizzontali cicliche crescenti, ma applicate in maniera pseudo-statica, per la maggior facilità di gestione dei dati nella fase di interpretazione analitica successiva;
- un test sismico su tavola vibrante eseguita su un edificio di tre piani in scala reale, allo scopo di validare/confermare i risultati ottenuti nella campagna di prove precedente.

Gli studi scientifici suddetti sono stati condotti, nel periodo compreso fra gli anni 2005-2012, presso il Laboratorio "Trees Lab" del Centro Sismico Europeo EUCENTRE di Pavia (Responsabile: Prof. Ing. Alberto Pavese), sotto il coordinamento scientifico del Prof. Ing. Claudio Ceccoli, con la collaborazione del Prof. Ing. Tomaso Trombetti, del Dott. Ing. Gilberto Dallavalle e con il contributo della dott.ssa Ing. Ilaria Ricci e dello scrivente, in qualità di ricercatori dottorandi.

3.2.2 Le prove cicliche pseudo-statiche effettuate su singole pareti e su una porzione di struttura di due piani

La campagna di prove è stata indirizzata alla valutazione del comportamento monotono e ciclico dei componenti di base del metodo costruttivo, ovvero delle pareti portanti con o senza aperture, e delle unioni orizzontali (parete – fondazione e parete solaio) e verticali (parete – parete), anche attraverso l'esecuzione di una prova ciclica pseudo-statica su una porzione di edificio in scala reale.
Nel dettaglio, le prove sono state eseguite su 4 pareti sandwich Nidyon NYSP (figura 11) di dimensioni 300x275 cm e di spessore complessivo pari a 18cm (ovvero 4+10+4 cm), su 2 pareti di analoghe dimensioni caratterizzate dalla presenza di un'apertura centrale di dimensioni 100x100 cm (figura 12), e da una porzione di edificio a due piani (il primo livello posto a quota 3 m il secondo a quota 6 m), con sviluppo in pianta ad H (figura 13); la parete d'anima di larghezza 336 cm e le due pareti d'ala di larghezza 275 cm.
La costruzione dei campioni è stata eseguita in accordo con la sequenza realizzativa prevista dal metodo costruttivo Nidyon NYSP.
Il carico ciclico orizzontale è stato applicato, mediante martinetti idraulici a doppio effetto, in corrispondenza dei cordoli di piano. Tutti i cicli di carico orizzontale sono stati sviluppati in controllo di spostamento imponendo alle pareti spostamenti massimi (interstorey drifts) positivi e negativi crescenti per 3 cicli completi di carico. I carichi orizzontali sono stati incrementati fino al raggiungimento della condizione di "collasso virtuale" (con tale espressione si intende il manifestarsi di una evidente riduzione della resistenza laterale dell'elemento provato). In corrispondenza di tale condizione è stato misurato lo spostamento ultimo sviluppato dalla parete e la prova è stata interrotta.

La numerosità delle prove ha consentito di ottenere risultati sotto differenti azioni verticali imposte, allo scopo di simulare differenti situazioni di carico gravitazionale delle pareti (parete di spina più caricata - parete di estremità meno caricata).

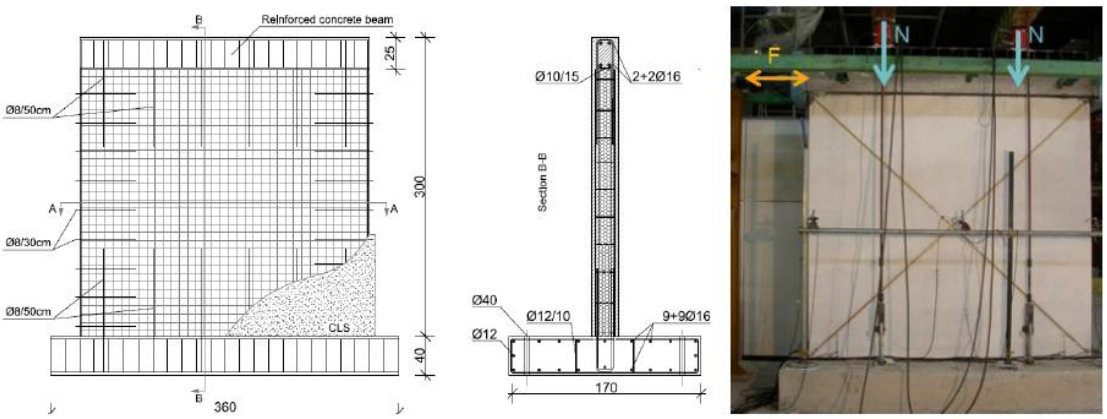

Figura 11. Schema e foto di una delle 4 pareti senza aperture testate a rottura.

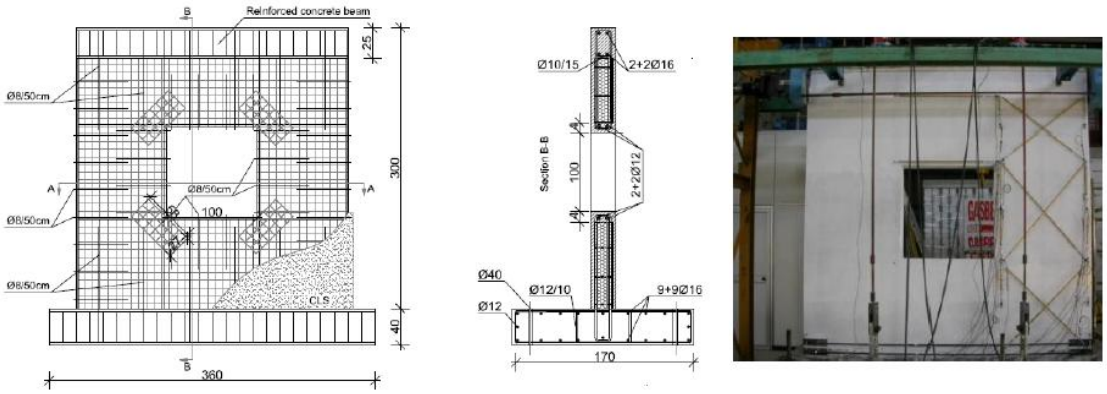

Figura 12. Schema e foto di una delle 2 pareti con aperture testate a rottura.

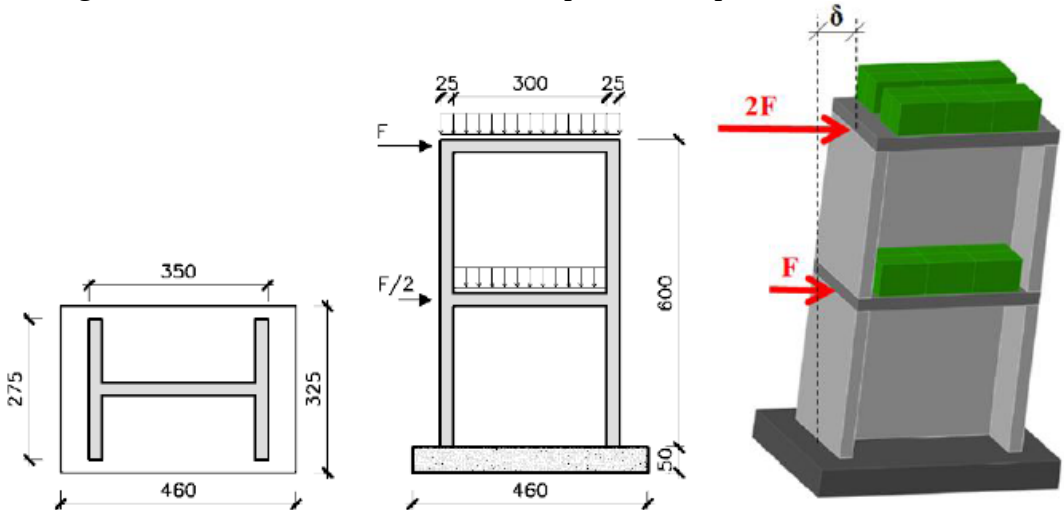

Figura 13. Pianta, sezione e vista assonometrica della porzione di struttura a due piani testata a rottura.

L'*"adeguata capacità di dissipare energia in campo inelastico per azioni cicliche ripetute"* (requisito previsto al cap. 7.4.1 del D.M. 14-01-2008 [5]) è chiaramente emersa dalle prove effettuate, dal momento che si sono ottenuti:

- considerevoli valori di duttilità cinematica μ_c mediamente pari a 6,94 (pareti senza aperture), 6,78 (pareti con aperture) e 4,79 (edificio a due piani con pianta ad H) ed
- elevati valori di smorzamento viscoso equivalente compresi fra il 6% ed il 18% al variare dello stato di sollecitazione applicato.

Per quanto attiene la necessità di evitare *"riduzioni significative della resistenza nei confronti delle azioni sia verticali che orizzontali"* (previsto ancora al cap. 7.4.1 del [5]), vale la pena evidenziare come tutti gli elementi provati, anche a fronte di deformazioni orizzontali corrispondenti alle richieste di duttilità cinematica sopra elencate,

- non abbiano mai raggiunto un vero e proprio collasso; il carico orizzontale è stato incrementato fino alla condizione di "collasso virtuale", così come sopra definita;
- abbiano sempre mostrato di mantenere la piena capacità portante nei confronti dei carichi verticali;
- abbiano mostrato un ridotto degrado della resistenza nei confronti dei carichi orizzontali, così come chiaramente desumibile dalle figure di seguito riportate.

Inoltre, è importante sottolineare come tutti gli elementi provati

- abbiano raggiunto resistenze elevatissime (i valori di carico orizzontale a snervamento ottenuti sono stati sempre paragonabili o addirittura superiori ai carichi verticali di prova; ad esempio, la forza massima orizzontale applicata sulla porzione di edificio a due piani con pianta ad H è risultata essere pari a 500kN, contro un carico verticale imposto pari a 200kN),
- abbiano sempre manifestato un quadro fessurativo compatibile con un meccanismo di rottura di tipo flessionale e non tagliante,

e come

- il corretto funzionamento delle connessioni tra pareti e tra pareti e solai abbia consentito alla porzione di edificio a due piani con pianta ad H di comportarsi come un elemento monolitico a doppio T, mostrando un comportamento di tipo scatolare coerente, fra l'altro, con i principi della gerarchia delle resistenze.

Al fine di illustrare i risultati sopra richiamati, di seguito si riportano alcune figure, che mostrano rispettivamente:

- per la prova n. 1, relativa ad una parete senza aperture, **(a)** il diagramma forza-spostamento in sommità, **(b)** il quadro fessurativo osservato e **(c)** l'inviluppo e la corrispondente schematizzazione bilineare delle curve relative al primo ciclo di carico;
- per la prova n. 3, relativa ad una parete con aperture, **(d)** il diagramma forza-spostamento in sommità, **(e)** il quadro fessurativo osservato e **(f)** l'inviluppo e la corrispondente schematizzazione bilineare delle curve relative al primo ciclo di carico;
- per la prova n. 7, relativa alla porzione di edificio a due piani con pianta ad H, **(g)** il diagramma forza-spostamento in sommità, **(h)** il quadro fessurativo osser-

vato e **(i)** l'inviluppo e la corrispondente schematizzazione bilineare delle curve relative al primo ciclo di carico.

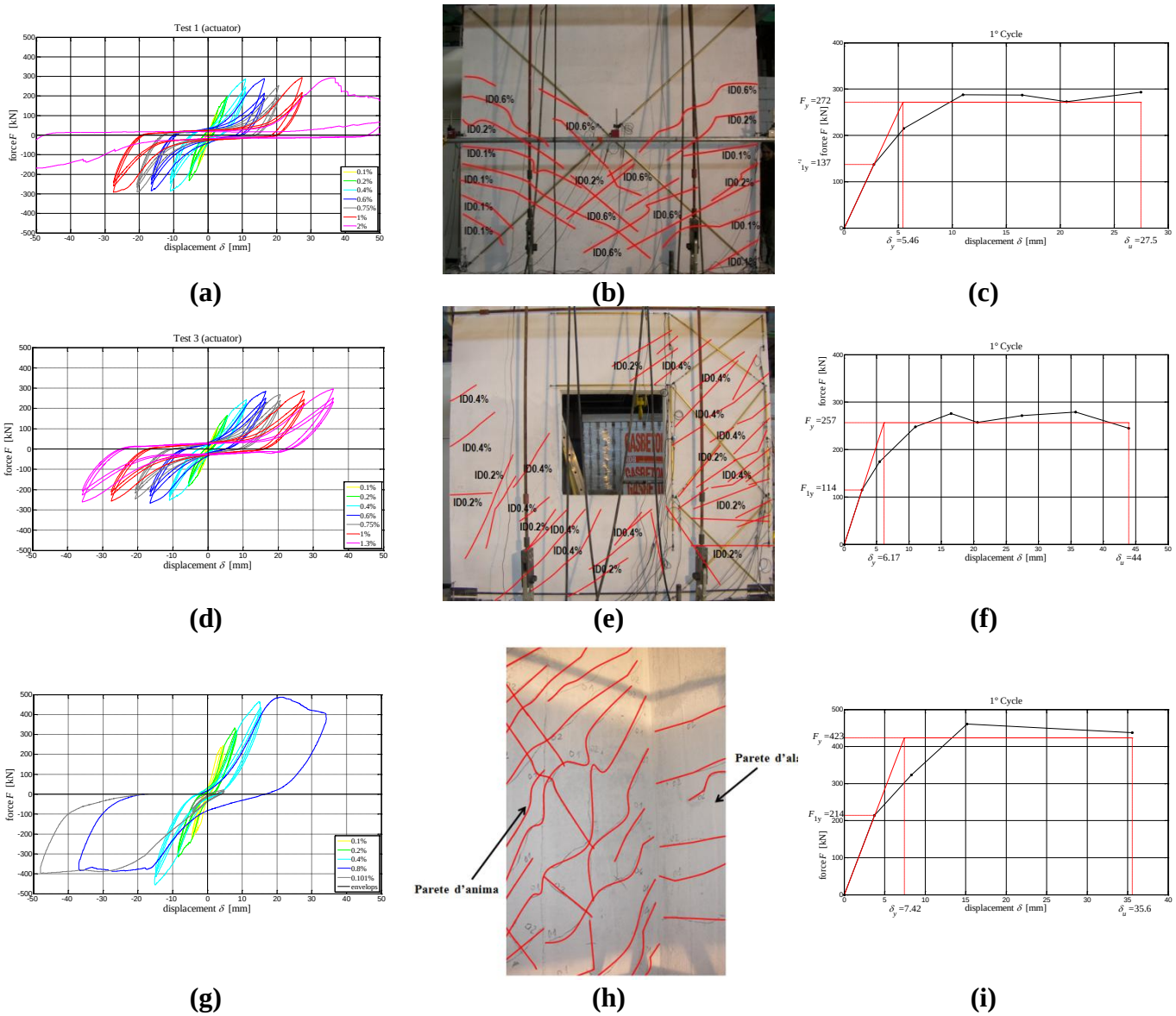

Figura 14. Risultati delle prove cicliche pseudo-statiche effettuate su singole pareti e su una porzione di struttura a due piani.

3.2.3 La prova sismica su tavola vibrante effettuata su un edificio campione in scala reale di tre piani

Nel Dicembre 2011 è stata portata a termine presso EUCENTRE una serie di prove su tavola vibrante, nell'ambito del progetto di ricerca dell'Unione Europea denominato "SERIES Project" [8]

Il Progetto di Ricerca, sviluppato da un gruppo di ricercatori appartenenti a diverse Università europee (Università di Alicante, Bologna, Cluj Napoca, Politecnico di Bari), era finalizzato allo studio del comportamento antisismico delle tecnologie costruttive innovative a pareti debolmente armate gettate in opera ed è stato interamente finanziato dall'Unione Europea.

Il gruppo di ricercatori ha scelto, fra i vari produttori presenti sul mercato, l'azienda italiana Nidyon Costruzioni di Santarcangelo di Romagna, titolare del metodo costruttivo Nidyon - Pannello Singolo Portante (NYSP). Successivamente, hanno progettato un edificio di 3 piani in grandezza reale (costruito nel Maggio 2011 presso EUCENTRE, figura 15), costituito interamente da pareti Nidyon NYSP e da solai Nidyon NYF. È importante sottolineare come l'edificio sia stato realizzato utilizzando il 50% delle armature solitamente previste, poiché la finalità scientifica dello studio era quella di portare la struttura in prossimità della sua rottura.

Figura 15. Immagini della struttura per la tavola vibrante durante la sua costruzione, nel maggio del 2011.

La struttura è stata sottoposta a scosse sismiche orizzontali di tipo monoassiale. Le prove hanno occupato i ricercatori per alcune settimane; inizialmente, test propedeutici a bassa intensità hanno consentito di tarare la corposa strumentazione e di effettuare la caratterizzazione dinamica del campione (frequenze e modi propri di vibrazione). Le scosse di maggiore intensità sono state realizzate il 6, 7 e 16 Dicembre 2011, utilizzando un accelerogramma reale con PGA pari a 1.28 g. In altre parole si è applicata, per 3 volte, un'azione sismica di intensità doppia rispetto a quella massima registrata nel terremoto de L'Aquila del 2009 (fra l'altro, si pensi che la massima accelerazione a_g prevista dal D.M. 14-01-2008 vale al massimo 0.28 g). L'edificio ha sopportato i violenti scuotimenti senza subire danni, come si può evincere anche dai video della prova reperibili on-line [9, 10].

Un tale esito del test è risultato essere certamente superiore alle aspettative. Infatti, dai calcoli preliminari effettuati in fase di progettazione, emergeva che la struttura, la quale riportava (lo ricordiamo) il 50% delle armature solitamente previste, avrebbe dovuto manifestare ampie escursioni in campo plastico per effetto dello snervamento dell'acciaio. Ciò non è avvenuto, principalmente a seguito della sovraresistenza manifestata dal calcestruzzo, che ha esibito una resistenza a trazione non prevista senza manifestare alcun cracking.

In definitiva, il risultato della prova ha confermato in pieno quanto già emerso dagli studi scientifici effettuati negli anni per la messa a punto del metodo costruttivo i quali, per la verità, hanno fornito dati sperimentali più cautelativi, perché esenti dalla sovraresistenza a trazione del calcestruzzo. Si fa presente come il conglomerato impiegato nella realizzazione dell'edificio da testare su tavola vibrante era caratterizzato da identica tipologia, classe di resistenza e modalità di esecuzione di quello utilizzato per i campioni provati sotto azioni cicliche pseudo-statiche. Quindi, è ragionevole dedurre che, evidentemente, le azioni cicliche dinamiche "reali" generate mediante la tavola vibrante

(caratterizzate da azioni che mutano repentinamente intensità e verso) sono risultate essere meno gravose dell'applicazione di azioni cicliche applicate in maniera "quasi statica", le quali, evidentemente, avevano condotto ad una diffusa fessurazione del calcestruzzo.

4 Sintesi delle caratteristiche strutturali emerse attraverso gli studi effettuati

4.1 Caratteristiche strutturali delle pareti sandwich

Il metodo costruttivo Nidyon "NYSP" è utilizzato per realizzare edifici fino a tre piani fuori terra. Da tale peculiarità del metodo costruttivo, risulta che le pareti sandwich che lo costituiscono hanno un rapporto fra altezza e lunghezza approssimativamente minore o uguale a 2. Pertanto le pareti che si vengono a realizzare sono sostanzialmente "tozze".
Inoltre, tali pareti sono caratterizzate da un differente comportamento nel piano e fuori dal piano.
Le ricerche condotte in merito al comportamento fuori dal piano delle pareti sandwich hanno permesso di concludere che il metodo generale di verifica nei confronti delle azioni gravitazionali previsto dalle normative sui pannelli sandwich [6, 7] è applicabile anche per le pareti in questione.
Le ricerche condotte in merito al comportamento nel piano delle pareti sandwich hanno permesso di concludere quanto segue:

a. ROBUSTEZZA: le pareti sandwich risultano adeguatamente armate e non manifestano problemi di rotture anticipate per compressione.
b. MONOLITICITÀ: le due lastre in c.a. "centrifugate" (connesse tra loro attraverso connettori metallici, saldati in stabilimento alle due reti esterne) possono essere considerate collaboranti al punto da poter considerare il sandwich come un'unica parete monolitica di spessore complessivo pari alla somma degli spessori delle due lastre (4+4 cm). Pertanto, è lecito effettuare le verifiche di resistenza e deformabilità considerando le pareti sandwich Nidyon "NYSP" equivalenti a consueti setti in calcestruzzo debolmente armato.
c. APPLICAZIONE DELLA GERARCHIA DELLE RESISTENZE: le pareti sono caratterizzate dalla stessa quantità di armatura diffusa verticale e orizzontale e ciò, nella maggior parte dei casi, consente di garantire una crisi prevalentemente flessionale (e non tagliante) delle pareti, assicurando così il comportamento duttile delle pareti stesse (nonostante il fatto che tali pareti siano tozze). Ove ciò non fosse, è possibile prevedere una quantità di armatura orizzontale incrementata secondo le specifiche necessità. Pertanto, il meccanismo di rottura imposto per azioni di pressoflessione nel piano delle pareti è di tipo flessionale.
d. CARATTERIZZAZIONE DEL MECCANISMO DI ROTTURA FLESSIONALE IMPOSTO: il sistema strutturale è costituito prevalentemente da pareti caratterizzate da ridotti tassi di lavoro a sforzo assiale, in quanto le strutture realizzate sono di modesta altezza (al massimo 3 piani) e le azioni verticali sono distribuite in maniera uniforme su tutte le pareti portanti. Nel momento in cui vengono applicate le a-

zioni orizzontali di tipo sismico, il meccanismo di rottura flessionale imposto si manifesta con rottura duttile lato acciaio, in quanto il calcestruzzo risulta sufficientemente riposato. Per tali motivi, non risulta necessaria la realizzazione dei "classici" dettagli costruttivi normalmente previsti per i pilastri e per le pareti "snelle", atti a garantire il confinamento del calcestruzzo e ad evitare l'instabilità delle barre longitudinali compresse, come risulta dalle ricerche sopra citate. In particolare, nella realizzazione dei dettagli costruttivi, non vengono applicate integralmente le prescrizioni relative ai dettagli per la duttilità previsti nel DM 14/01/2008 per le pareti "snelle" in c.a. (cap. 7.4.4.5 Dimensionamento e Verifica degli Elementi Strutturali - Pareti; cap. 7.4.6.1.4 Dettagli Costruttivi - Limitazioni Geometriche - Pareti; cap. 7.4.6.2.4 Dettagli Costruttivi - Limitazioni di Armatura - Pareti).

e. COMPORTAMENTO DUTTILE: il comportamento duttile delle pareti è chiaramente emerso nel corso delle ricerche effettuate. In particolare, è stato possibile ottenere valori sperimentali della duttilità cinematica (fra l'altro confrontabili con i corrispondenti valori teorici ottenuti analiticamente applicando la formula di valutazione della duttilità cinematica suggerita da Priestley et al nel 2007 per pareti snelle di tipo tradizionale [11]) pari a:
   - 6.94 per le pareti senza aperture con rapporto altezza-larghezza pari a 1,
   - 6.78 per le pareti con aperture con rapporto altezza-larghezza pari a 1,
   - 4.8 per la porzione di struttura a due piani con sviluppo in pianta ad H.

   Tale comportamento viene ottenuto facendo ricorso a speciali dettagli costruttivi, specificatamente messi a punto per le pareti tozze di tipo sandwich Nidyon "NYSP" e grazie alle caratteristiche descritte nei precedenti punti c. e d. Le Ricerche condotte negli anni in merito alla valutazione del comportamento ciclico-dinamico delle pareti sandwich, hanno consentito di verificare l'efficacia di tali dettagli costruttivi per la duttilità.

f. INFLUENZA DELLE APERTURE: come è chiaramente emerso, la presenza di aperture non riduce la capacità resistente delle pareti, grazie alla presenza delle riquadrature (che introducono un quantitativo di armatura che, seppur concentrato, compensa il quantitativo di armatura presente nella porzione di parete tolta per far posto all'apertura); le sperimentazioni effettuate hanno permesso di verificare come il comportamento duttile non subisca sostanziali variazioni rispetto a quello osservato per pareti senza aperture, sia qualitativamente (tipologia del meccanismo di rottura) che quantitativamente (valori di duttilità cinematica).I traversi delle aperture (le travi di accoppiamento) vengono trattati rispettando le prescrizioni di cui al cap. 7.4.4.6 Dimensionamento e Verifica degli Elementi Strutturali - Travi di Accoppiamento dei Sistemi a Pareti e al cap. 7.4.6.2.5 Dettagli Costruttivi - Limitazioni di Armatura - Travi di Accoppiamento del D.M. 2008. Poiché nella maggior parte dei casi, i traversi sono caratterizzati da una configurazione tozza, occorrerà verificare (formula 7.4.22 del D.M. 2008) che la sollecitazione di taglio di calcolo, V_{Ed}, risulti minore o uguale a $f_{ctd} \cdot b \cdot d$ (essendo f_{ctd} la resistenza a trazione di

progetto del calcestruzzo; b la larghezza e d l'altezza utile della sezione). Nel caso in cui tale verifica non risulti soddisfatta, nella modellazione della struttura non dovrà essere considerato il contributo flessionale dei traversi (le pareti collegate dai traversi dovranno essere considerate come mensole collegate da bielle). Nell'ambito delle ricerche effettuate non sono state osservate rotture in corrispondenza dei traversi dei campioni di parete provati.

4.2 Caratteristiche strutturali delle connessioni

Le connessioni sono fondamentali per garantire il comportamento scatolare. In particolare, nei sistemi strutturali realizzati mediante il metodo costruttivo Nidyon "NYSP", tutte le connessioni, sia quelle parete - parete che parete - solaio, sono dimensionate nell'ottica della gerarchia delle resistenze, in modo tale da garantire il raggiungimento del limite elastico (a flessione) delle pareti prima della loro crisi per sollecitazioni taglianti, a sua volta imposta prima del sopraggiungere della crisi delle connessioni stesse. Tale comportamento corrisponde a quello osservato nell'ambito della ricerca effettuata sulla struttura a due piani con sviluppo in pianta ad H.

La progettazione delle connessioni, sebbene siano stati semplificati e standardizzati sulla base delle indicazioni fornite dall'Azienda madre, va comunque effettuata considerando caso per caso le luci e le sollecitazioni agenti. Pertanto, è compito del progettista delle strutture di adottare i quantitativi di armatura adeguati al caso specifico.

4.3 Caratteristiche strutturali dei solai

I solai devono costituire un piano rigido capace di ripartire le azioni orizzontali fra tutte le pareti. Per tale motivo devono essere verificati in conformità al cap. 7.4.4.4 del D.M. 2008. In particolare, i solai devono essere considerati come travi-parete nel proprio piano e l'armatura degli incatenamenti deve essere dimensionata al fine di poter trasmettere le forze ottenute dall'analisi sismica incrementate del 30%.

5 Insegnamenti di natura progettuale e importanza della sinergia tra produttore e progettista

Le confortanti risultanze sperimentali, ottenute in seguito ai numerosi studi sopra richiamati, consentono di considerare, per le strutture Nidyon NYSP, una concezione strutturale ed uno schema statico che non si discostano da quelli adottati per le normali costruzioni in muratura ordinaria, mentre la verifica degli elementi strutturali può avvenire analogamente alle normali strutture in c.a.

Ciò non significa che con tale tecnologia costruttiva possono essere realizzate solamente strutture "semplici" (oggetti molto rari nell'edilizia odierna!); al contrario, è possibile realizzare edifici caratterizzati anche da irregolarità strutturali importanti, ma nello stesso tempo è fortemente consigliato che questi casi speciali vadano analizzati dal progettista in stretta sinergia con l'Azienda madre, che possiede il Know How idoneo a risolvere le singole problematiche particolari.

Particolarmente delicata, inoltre, è la fase esecutiva della costruzione ai fini del raggiungimento di un risultato finale ottimale (questione che, per la verità, risulta valida per tutte le tipologie costruttive). A tale proposito va sottolineato che l'Azienda Nidyon:

1. ha dettagliatamente definito le più corrette fasi esecutive relativamente al montaggio dei pannelli,all'applicazione del calcestruzzo, agli accorgimenti da adottare nelle fasi di finitura;
2. ne dà completa comunicazione alle imprese esecutrici fornendo un apposito servizio di assistenza (in particolar modo con chi utilizza saltuariamente il metodo costruttivo), attraverso propri tecnici inviati in cantiere ad istruire le maestranze ed a supportare lo stesso Direttore dei Lavori nella delicata fase di controllo da effettuare prima e durante i getti.

6 Conclusioni

Gli studi scientifici descritti nel presente articolo, sviluppati nell'arco di circa un decennio, avevano l'obiettivo di identificare (sotto azioni statiche e sismiche) il comportamento delle strutture realizzate secondo la tecnologia costruttiva Nidyon "NYSP", allo scopo di definire adeguate indicazioni progettuali ed esecutive.

Tale tecnologia, basata sulla produzione (in stabilimento) e sull'utilizzo (in cantiere) di pannelli modulari in polistirene espanso completati in opera con l'applicazione di calcestruzzo, consente di ottenere pareti portanti di tipo "sandwich" caratterizzate da percentuali di armatura orizzontale sufficientemente elevate allo scopo di scongiurare crisi per taglio e da limitazioni autoimposte ai carichi verticali tali da indurre un meccanismo di rottura di tipo flessionale lato acciaio.

I risultati ottenuti indicano come tali elementi strutturali mostrino una ottima affidabilità (le resistenze di progetto calcolate in accordo con le formulazioni valide per le normali pareti in c.a. conducono a valori cautelativi e sono quindi pienamente utilizzabili ai fini progettuali), una considerevole resistenza nei confronti delle azioni orizzontali (che consente di effettuare la progettazione sismica come struttura non dissipativa – q = 1 – senza particolari raffittimenti di armatura), un buon comportamento duttile (con valori equivalenti, se non superiori, a quelli desumibili dalle strutture in calcestruzzo armato "tradizionale").

Ciò consente di affermare come gli strumenti analitici messi a punto dall'Azienda Nidyon e qui richiamati possano essere utilizzati nella progettazione sismica delle strutture realizzate mediante la tecnologia costruttiva, con garanzia di ottenere una qualità del costruito di alto livello.

7 Bibliografia

[1] C Coull A., Stafford Smith B. "Tall Buildings". The Proceedings of a Symposium on Tall Buildings with particular reference to Shear Wall Structures, Southampton, April 1966.

[2] Fajfar P., Duhovnik J., Reflak J., Fischinger M., Breska Z. "The Behavior of Buildings and Other Structures during the Earthquakes of 1979 in Montenegro", IKPIR Publication No. 19A, University of Ljubljana, 175 pp. 1981.

[3] Fintel M., "Ductile Shear Walls in Earthquake Resistant Multistory Buildings" ACI journal Proceedings Volume 71, N. 6, pp. 296-305, June 1974.

[4] Panagiotou M., Restrepo J. I., Conte J. P. and Englekirk R. E., "Seismic Response of Reinforced Concrete Wall Buildings", Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake engineering, Paper No. 1494, San Francisco, California, USA, April 18-22 2006.

[5] Ministero LL. PP., D. M. 14-01-2008, "Norme Tecniche per le Costruzioni".
[6] Ministero LL. PP., Circolare 6090, "Norme per il calcolo e la costruzione di strutture a grandi pannelli", 11-8-1969.
[7] CNR, "CNR-UNI 10025: Istruzioni per il progetto, l'esecuzione ed il controllo delle strutture prefabbricate in conglomerato cementizio e per le strutture costruite con sistemi industrializzati", 1984.
[8] Ilaria Ricci, , Dottorato di Ricerca in Ingegneria Strutturale e Idraulica, "*Sistemi Strutturali Cellulari A Pareti Portanti In Cemento Armato Gettato In Opera Realizzate Con La Tecnologia Del Pannello Di Supporto In Polistirene".* Università di Bologna, 2012.
[9] 7 Dicembre 2011, prova sismica su tavola vibrante,. http://youtu.be/JInmHldChlc
[10] 7 Dicembre 2011, intervista ai Proff. Alberto Pavese e Tomaso Trombetti. http://youtu.be/UH0ydOQV_OA
[11] Priestley M.J.N., Paulay T., 1992. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, Wiley Interscience Press publication, John Wiley & Sons, inc.