

**M2**

EMIMEDUE

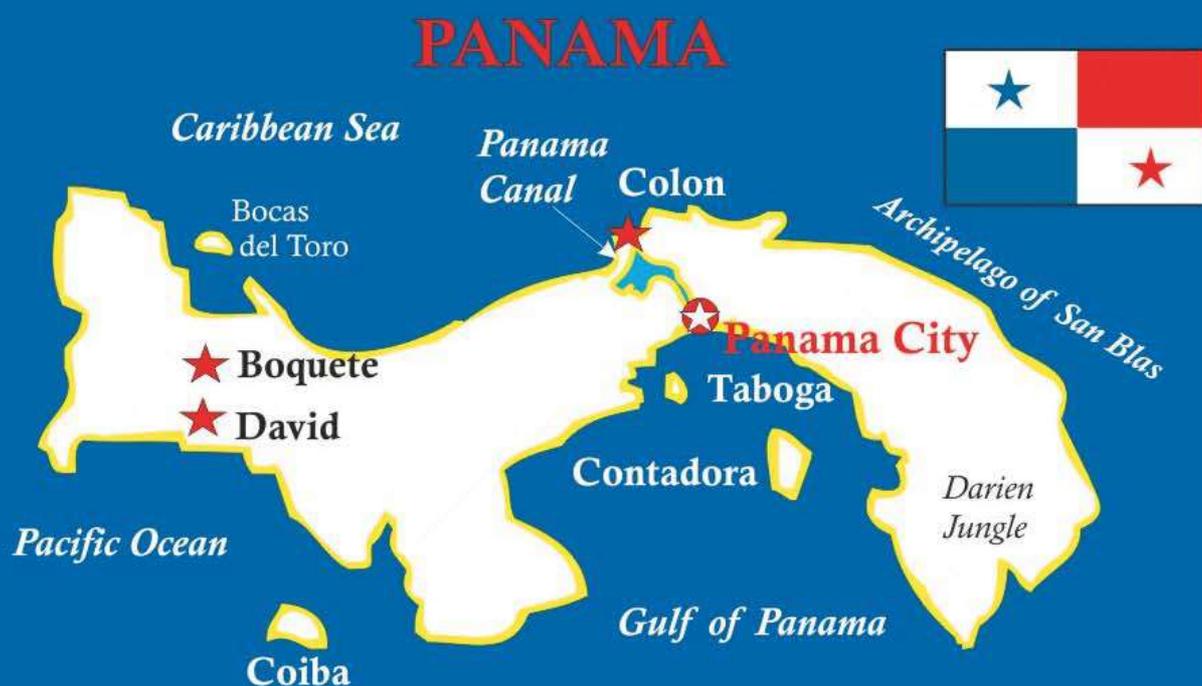
Advanced  
Building  
System

**UNIVERSITÀ TECNOLOGICA DI PANAMA  
CENTRO SPERIMENTALE DI INGEGNERIA**

**Laboratorio di ricerca e sviluppo**

**RELAZIONE N. CEI-07-798-2003**

**PROVE SPERIMENTALI DEL SISTEMA DI PANNELLI  
CAMPIONE TIPO 60 E PSM 80 DI EMMEDUE**



Per: ITALPAN, S.A.

Presentato da:

Dr. Oscar M. Ramírez  
Lic. No.-85/006/014  
Director



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PANAMÁ**

**CENTRO EXPERIMENTAL DE INGENIERÍA**

*"Preparémonos para conmemorar El Centenario"*



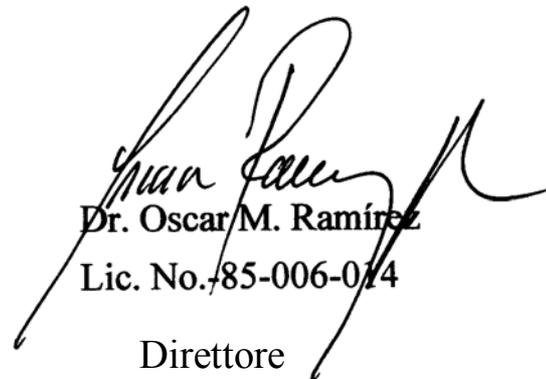
RELAZIONE N° CEI-07-798-2003

Prove Sperimentali del Sistema di Pannelli  
Campione Tipo 60 e PSM 80 di M2

Per: ITALPAN S.A.

Presentato da:



  
Dr. Oscar M. Ramírez  
Lic. No. 85-006-074  
Direttore

Panama, 5 settembre 2003



### GRUPPO DI LAVORO

Coordinamento Generale e Direzione

*Dr. Oscar M. Ramírez, Direttore del CEI*

*Ing. Oscar Patiño, Capo del Laboratorio di Collaudi sui Materiali*

Coordinamento Prove e Analisi

Ing. José Gallardo, Lab. Di Ricerca e Sviluppo

Coordinamento per la Costruzione

Ing. José Sanchez, Lab. Di Materiali

Consulente per la Costruzione

Tec-Ing. Eduardo Gonzalez – ITALPAN, S.A.

Collaboratori:

*Ing. Agustín Rios,*

*Lab. di Materiali*

*Ing. Juan Noie*

*Ricerca e Sviluppo*

*Sr. Henry Tenorio*

*Lab. di Materiali*

*Sr. Rolando González*

*Lab. di Materiali*

*Sr. Elio Urriola*

*Lab. di Materiali*

*Jorge Diaz*

*Lab. di Materiali*

*Rogelio Peralta*

*Lab. di Materiali*



### INDICE

1	Scopo.....	1
2	Introduzione.....	1
2.1	Caratteristiche del Pannello.....	1
3	Prove sperimentali .....	3
3.1	Prove sugli elementi (Pannelli e collegamenti) .....	3
3.1.1	Prove al taglio sui pannelli PSM 60 e PSM 80.....	3
3.1.2	Prova di resistenza alla compressione dei pannelli PSM 60 e PSM 80 .....	7
3.1.3	Prova di resistenza alla flessione su pannelli PSM 60 e PSM 80 di luce di 2.13 m .....	8
3.1.4	Prova sui collegamenti .....	15
3.2	Prova su abitazione .....	16
3.2.1	Costruzione .....	17
3.2.2	Proprietà dei materiali .....	21
3.2.3	Modello della casa.....	22
3.2.3.1	Sezione equivalente del Pannello PSM 60 e PSM 80 .....	22
3.2.3.2	Geometria del modello .....	22
3.2.3.3	Carichi laterali di progetto .....	23
3.2.3.4	Analisi strutturale.....	24
3.2.4	Sistemazione e trasferimento del carico .....	29
4	Analisi dei risultati della prova sulla struttura modello .....	33
5	Conclusioni.....	39
	Appendice A, Relazioni delle prove sugli elementi.....	41



### INDICE DELLE FIGURE

#### FIGURA

2.1 Sezione pannello M2 .....	2
3.1 Prova al taglio sui pannelli .....	4
3.2 difetti al taglio dei pannelli.....	5
3.3 Grafico Carico – Deformazione per la prova al taglio dei pannelli PSM 60 .....	6
3.4 Grafico Carico – Deformazione per la prova al taglio dei pannelli PSM 80 .....	6
3.5 Pannello, filo perimetrale e regoli per la visualizzazione delle deformazioni .....	8
3.6 applicazione di carico assiale al pannello .....	8
3.7 Grafico carico – deformazione per il pannello PSM 60 sottomesso a flessione .....	9
3.8 Grafico carico – deformazione per il pannello PSM 60 sottomesso a flessione .....	10
3.9 Schema per la determinazione della rigidità a flessione dei pannelli .....	12
3.10 Installazione del sistema di carichi per la prova a flessione .....	14
3.11 Incrinatura ad un quarto della lunghezza del pannello durante la prova a flessione .....	14
3.12 Unione dei pannelli .....	16
3.13 Difetto tipico del collegamento angolare con carico pari a 1591 kg (3500 libbre) .....	16
3.14 Pianta architettonica della casa modello per la prova .....	17
3.15 Facciata anteriore della casa modello per la prova .....	18
3.16 Scavo di fondazioni per la casa modello .....	18
3.17 Scavo per la soletta di fondazione per la casa modello .....	19
3.18 Schema di casa modello e ubicazione dei diversi tipi di pannelli .....	20
3.19 Pianta del modello strutturale .....	23
3.20 Spettro di risposta elastico per la Repubblica di Panama .....	23
3.21 Schema generale della struttura e carichi applicati al modello .....	25
3.22 Schema e nomenclatura utilizzata per le pareti della casa modello .....	26



3.23 Schema degli sforzi Von Misses per le pareti che presentano maggiori concentrazioni di sforzi.....	28
3.24 Schema struttura di prova (vista laterale).....	30
3.25 Schema struttura di prova (vista in pianta).....	30
3.26 Armatura di acciaio della struttura di fissaggio.....	31
3.27 Scavo per il blocco di fissaggio.....	31
3.28 Sistemazione della trave per la distribuzione del carico.....	31
3.29 Struttura di fissaggio e martinetti idraulici.....	32
4.1 Grafico Forza – Deformazione per i diversi punti di lettura.....	34
4.2 Grafico Forza orizzontale applicata – Deformazione media.....	35
4.3 Incrinature nella parte frontale della casa.....	35
4.4 Incrinature nell'angolo posteriore sinistro della casa.....	36
4.5 Incrinature negli angoli dei vani porta all'interno della casa.....	37
4.6 Incrinature all'interno della casa e in un angolo del vano finestra.....	38
5.1 Coefficiente di accelerazione massima relativa alla velocità $A_v$ (REP-94).....	40



### INDICE DELLE TABELLE

#### TABELLA

2.1 Dimensioni dei differenti tipi di pannelli .....	2
3.1 Dati ottenuti dalla prova al taglio su pannelli PSM 60 .....	4
3.2 Dati ottenuti dalla prova al taglio su pannelli PSM 80 .....	5
3.3 Risultati della prova a compressioni dei pannelli .....	7
3.4 Risultati della prova a flessione sui pannelli PSM 60 .....	9
3.5 risultati della prova a flessione sui pannelli PSM 80.....	10
3.6 Capacità massima a flessione registrata per i pannelli, luce di 2.13 m (7 piedi) .....	11
3.7 Sforzo di deformazione para il comportamento a flessione dei pannelli.....	12
3.8 Calcolo della rigidità a flessione dei pannelli .....	13
3.9 Risultato delle prove sui collegamenti piani .....	15
3.10 Risultato delle prove sui collegamenti angolari .....	15
3.11 Resistenza media del betoncino utilizzato nella casa modello dopo 28 giorni .....	21
3.12 Riassunto delle reazioni sugli appoggi per settore di parete .....	25
4.1 Deformazioni in ogni punto di lettura sotto diversi livelli di carico.....	33



### PROVE SPERIMENTALI REALIZZATE AL SISTEMA DI

### PANNELLI CAMPIONE, TIPO PSM 60 E PSM 80

#### 1. Scopo

Lo scopo di questo studio è determinare per via sperimentale se il sistema di pannelli strutturali PSM 60 e PMS 80, sottomessi a prove nel CEI su richiesta di ITALPAN S.A. adempie i requisiti che esige il Regolamento Strutturale Panamense (REP-94) per l'uso di sistemi alternativi per la costruzione di abitazioni di modeste dimensioni,

#### 2. Introduzione

Il Regolamento Strutturale Panamense, REP-94 nella sua sezione 6.6 riguardante i sistemi alternativi stabilisce quanto seguente:

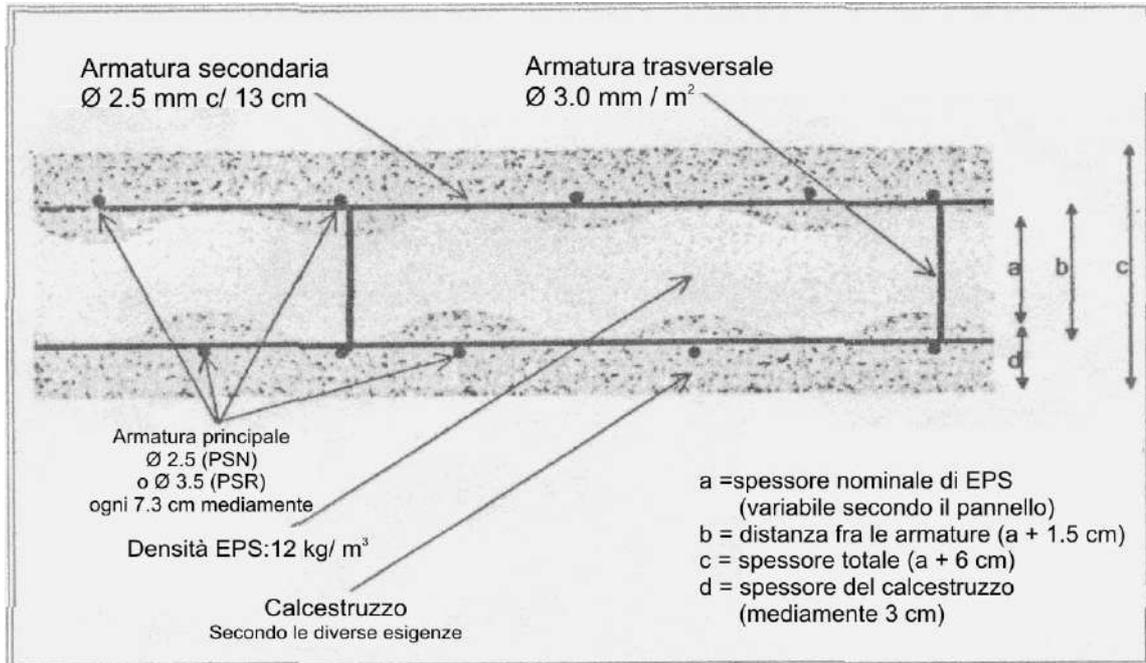
“Si potranno utilizzare sistemi costruttivi diversi dall'edilizia tradizionale definita nella sezione 6.4 a condizione che si dimostri mediante analisi e prove sperimentali che la resistenza dei sistemi alternativi agli effetti della gravità, vento e sismi sia per lo meno equivalente a quella dell'edilizia tradizionale.”

Il sistema di pannelli PSM 60 e PSM 80 (in seguito denominati “Pannelli M2” in questo documento) è classificato come un sistema alternativo di costruzione in Panama e come tale deve essere sottomesso a prove sperimentali d'accordo con REP-94. Di seguito si descriveranno e presenteranno i risultati delle prove sperimentali realizzate dall'Università Tecnologica di Panama, mediante le quali si è determinato le capacità del sistema di pannelli M2. Le prove sperimentali realizzate sono state le seguenti:

- Prove realizzate su elementi individuali (pannelli e collegamenti)
  - Prova al taglio nel piano
  - Prova alla compressione
  - Prova di flessione
  - Prova sui collegamenti
- Prove realizzate su una struttura modello (in scala reale)
  - Prova di carichi laterali

#### 2.1 Caratteristiche del Pannello

Il Pannello M2 si presenta sotto diverse denominazioni, con una configurazione tipica, però con variazioni nelle dimensioni della sezione. Nella Figura 2.1 si mostra uno schema della sezione del pannello e nella Tabella 2.1 si indicano le corrispondenti dimensioni di ogni pannello.



**Figura 2.1** Sección de panel M2

**Tabella 2.1** - Dimensioni dei differenti tipi di pannelli

PANNELLO TIPO	a* (mm)	b* (mm)	c* (mm)
PSN60	60	75	120
PSN80	80	95	140

\*Si veda Figura 2.1

Il pannello ha una sezione composta da polistirolo, acciaio e malta cementizia come si osserva nella Figura 2.1. La capacità strutturale del pannello è data dal cemento e dall'acciaio. Il rinforzo dei pannelli è costituito da due reti di acciaio elettrosaldate formate da fili di acciaio da 2.5 mm di diametro distanziati di 62 mm orizzontalmente e 67 mm verticalmente. Secondo le specifiche queste reti hanno una resistenza ultima a tensione di 600 MPA (6100 kg/cm<sup>2</sup>). Il cemento avrà 30 mm di spessore su ogni faccia del pannello e la sua resistenza dipenderà dall'impasto usato per ogni opera.

Esistono diverse nomenclature per questo tipo di pannelli. Di seguito si segnalano altre denominazioni utilizzate per i pannelli sottomessi a prova.

Denominazione utilizzata in questo documento

PSM60  
PSM80

Denominazioni equivalenti

PSME60, PSN60  
PSME80, PSN80

### 3. Prove sperimentali

#### 3.1 Prove sugli elementi (Pannelli e collegamenti)

Le prove sugli elementi individuali si realizzeranno su campioni di pannelli e collegamenti. Sono state effettuate prove al taglio, flessione, compressione. Per verificare la capacità dei pannelli sono stati testati, per ogni prova realizzata, 3 moduli di 1.11 m (3.64 piedi) di larghezza per 2.4 m (7.87 piedi) di altezza dei pannelli di tipo PSM 60 e del tipo PSM 80. I pannelli sono stati rinzaftati su entrambe le facce fino ad ottenere uno spessore medio di 115 mm (4.53 pollici) per il pannello PSM 60 e 135 mm (5.31 pollici) per il pannello PSM 80. Le prove sono state realizzate secondo la norma ASTM – E – 72.

Questa prova è documentata dalla Relazione N° 02-798E-2003 e N° 02-798F-2003 (si veda Appendice A). La malta cementizia utilizzata per il rinzafto dei pannelli ha avuto una resistenza media di 119 kg/cm<sup>2</sup> (1696 lbs/pollici<sup>2</sup>) dopo 28 giorni. Il carico è stato applicato per mezzo di un martinetto idraulico con manometro di carico pari 2721.5 kg (6000 lb) su una estremità del pannello mantenendo incastrata l'altra estremità (si veda figura 3.1). Nelle Tabelle 3.1 e 3.2 si possono vedere i risultati ottenuti e nelle Figure 3.3 e 3.4 si mostra il grafico carico - deformazione per ogni pannello collaudato. Nella Figura 3.2 si mostra il pannello a fine prova.

Il comportamento dei pannelli PSM 60 in questa prova si può riassumere nel seguente modo:

- Il pannello 1 ha iniziato a incrinarsi sotto un carico di 3175.18 kg (7000 libbre). È evidente il difetto della malta cementizia per distacco mentre la rete inizia a cedere per tensione lungo tutta la larghezza del pannello nelle vicinanze del collegamento dell'estremità incastrata.
- Nel pannello 2, la prima incrinatura è comparsa sotto un carico di 2948.38 kg (6500 libbre), a 7.62 cm (3 pollici) dal fissaggio del collegamento. La seconda incrinatura compare a 1.01 m (40 pollici) dal collegamento sotto un carico di 3175.18 kg (7000 libbre), dove il difetto della malta cementizia è evidente; si nota infatti il distacco di questa, la separazione per tensione della rete nell'estremità incastrata e la continuazione della prima incrinatura lungo tutta la larghezza del pannello.
- Nel caso del Pannello 3 la prima incrinatura compare a 43.2 cm (17 pollici) e a 86.4 cm (34 pollici) dal collegamento sotto un carico di 3401.38 kg (7500 libbre) con distacco della malta cementizia, cedimento della rete per tensione e separazione di questa dall'incastro.

D'altra parte il pannello tipo PSM 80 ha evidenziato il seguente comportamento:

- Il pannello 1 ha iniziato a incrinarsi sotto un carico di 2948.38 kg (6500 libbre). È evidente il difetto della malta cementizia per distacco mentre la rete inizia a cedere per tensione lungo tutta la larghezza del pannello nelle vicinanze del collegamento dell'estremità incastrata.

- Nel pannello 2, la prima incrinatura è comparsa sotto un carico di 2721.58 kg (6000 libbre), a 7.62 cm (3 pollici) dal fissaggio del collegamento. La seconda incrinatura compare a 1.01 m (40 pollici) dalla base sotto un carico di 2948.38 kg (7500 libbre), dove il difetto della malta cementizia è evidente; si nota infatti il distacco di questo, la separazione per tensione delle rete nell'estremità incastrata e la continuazione della prima incrinatura lungo tutta la larghezza del pannello.
- Nel caso del Pannello 3 la prima incrinatura compare vicino al collegamento sotto un carico di 3175.18 kg (7000 libbre) con distacco della malta cementizia, cedimento della rete per tensione e separazione di questa dall'incastro. La seconda incrinatura si ha a 13 cm (34 pollici) dall'appoggio applicando un carico di 3041.98 kg (7500 libbre).



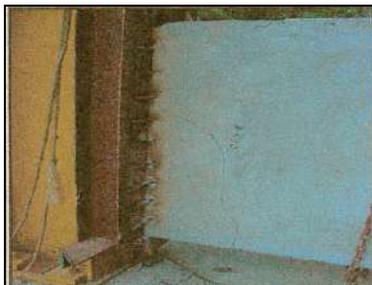
**Figura 3.1** Prova di resistenza al taglio sui pannelli

**Tabella 3.1** Risultati ottenuti dalla prova al taglio per i pannelli PSM 60

Carico	Sistema metrico			Sistema anglosassone			
	Deformazioni			Carico	Deformazioni		
	Pannello 1	Pannello 2	Pannello 3		Pannello 1	Pannello 2	Pannello 3
Kg	cm	cm	cm	lb	plg	plg	plg
0	0	0	0	0	0	0	0
453,60	0,160	0,100	0,160	1 000	0,063	0,040	0,063
680,39	0,200	0,200	0,240	1 500	0,079	0,079	0,094
907,19	0,320	0,330	0,320	2 000	0,126	0,130	0,126
1134,00	0,500	0,400	0,480	2 500	0,197	0,157	0,189
1360,50	0,635	0,500	0,640	3 000	0,250	0,197	0,252
1587,59	1,590	0,800	0,950	3 500	0,626	0,315	0,374
1814,39	1,900	1,300	1,600	4 000	0,748	0,512	0,630
2041,19	2,060	2,100	1,750	4 500	0,813	0,827	0,689
2267,99	2,300	2,700	1,900	5 000	0,906	1,063	0,748
2494,78	2,380	3,000	2,060	5 500	0,938	1,181	0,811
2721,58	2,540	3,500	2,220	6 000	1,000	1,378	0,874
2948,38	2,700	3,600	2,380	6 500	1,063	1,417	0,937
3175,18	3,600	4,000	2,860	7 000	1,417	1,575	1,126
3401,98			3,500	7 500			1,375

**Tabella 3.2** Risultati ottenuti dalla prova di resistenza al taglio per i pannelli PSM 80

Carico	Sistema Metrico			Carico	Sistema Inglese		
	Deformazioni				Deformazioni		
	Pannello 1	Pannello 2	Pannello 3		Pannello 1	Pannello 2	Pannello 3
Kg	cm	cm	cm	lb	plg	plg	plg
0	0	0	0	0	0	0	0
453,60	0	0	0	1000	0	0	0
680,39	0	0	0	1500	0	0	0
907,19	0,099	0,099	0,099	2 000	0,039	0,039	0,039
1134,00	0,201	0,248	0,150	2 500	0,079	0,098	0,059
1 360,50	0,500	0,800	0,299	3000	0,197	0,3 15	0,118
1 587,59	0,899	1,199	0,500	3 500	0,354	0,472	0,197
1814,39	1,300	1,801	1,000	4000	0,512	0,709	0,394
2 041,19	1,600	2,400	1,199	4 500	0,630	0,945	0,472
2 267,99	1,999	3,099	1,699	5 000	0,787	1,220	0,669
2 494,78	2,400	3,299	1,999	5 500	0,945	1,299	0,787
2721,58	2,700	3,599	2,298	6000	1,063	1,417	0,905
2948,38	3,200	4,200	2,601	6 500	1,260	1,653	1,024
3175,18			3,200	7000			1,260
3 401,98			3,500	7 500			1,378

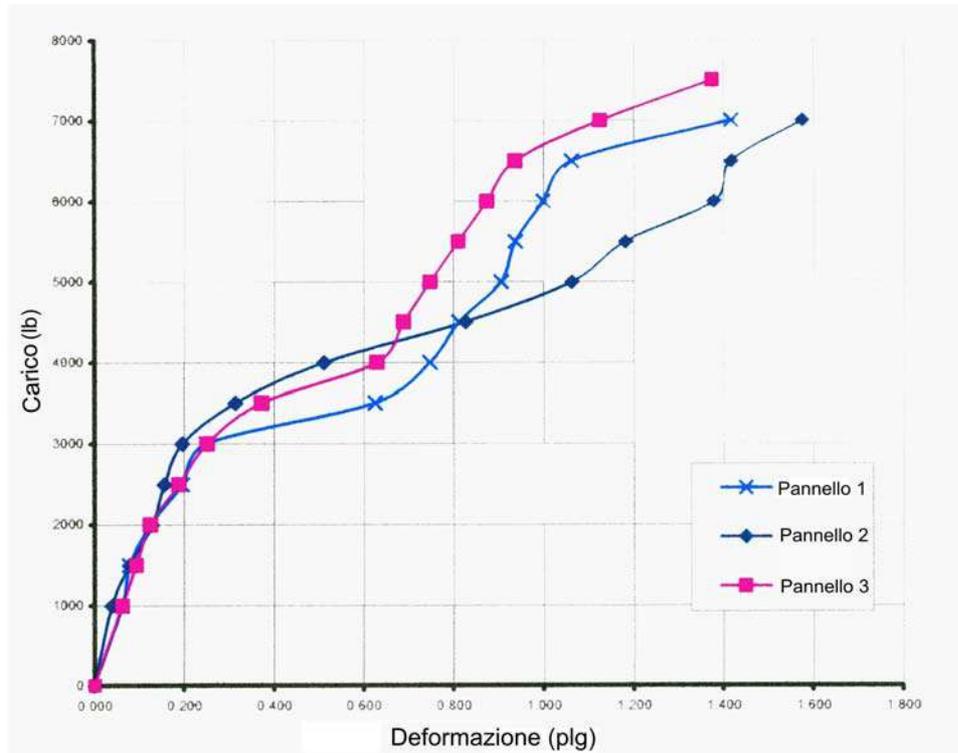


a) Pannello tipo PSM60

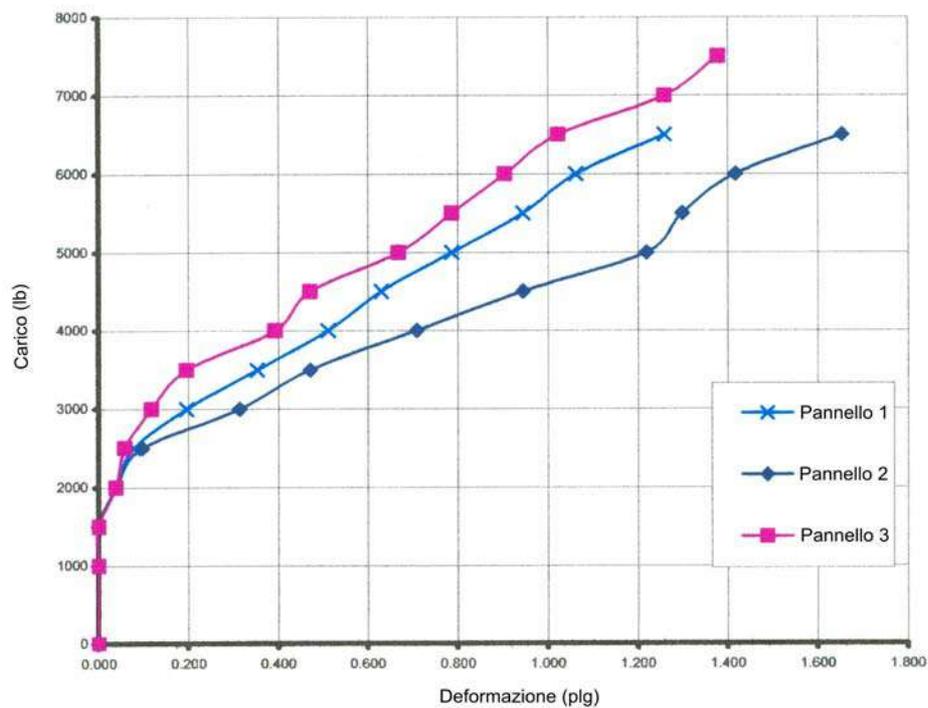


b) Pannello Tipo PSM80

**Figura 3.2** Difetti al taglio dei pannelli



**Figura 3.3** – Grafico Carico - Deformazione per la prova al taglio dei pannelli PSM 60



**Figura 3.4** - Grafico Carico - Deformazione per la prova al taglio dei pannelli PSM 80

Con i risultati di questa prova si può proporre per un area di spessore accettabile il seguente sforzo di taglio:

$$\tau_{\text{ammissibile}} = \frac{V}{A_g} \frac{1}{FS}$$

dove:

V: è la resistenza al taglio del pannello nel rango elastico

FS: è un fattore di sicurezza

$A_g$ : è l'area spessa delle pareti di calcestruzzo del pannello, valutata in seguito:

$$A_g = 111\text{cm} \cdot 6\text{cm} = 666\text{cm}^2$$

In quanto al taglio di deformazione si propone un valore pari a 1134 kg (2500 libbre) come valore rappresentativo per entrambi i pannelli; lo sforzo di taglio ammissibile si valuta di conseguenza come segue:

$$\tau_{\text{ammissibile}} = \frac{1134\text{Kg}}{666\text{cm}^2} \frac{1}{1,5} = 1,14\text{Kg/cm}^2$$

### 3.1.2 Prova di resistenza alla compressione dei pannelli PSM60 e PSM80

Sono state effettuate prove di resistenza alla compressione sui pannelli PSM 60 e PSM 80 che sono documentate nella relazione N° 02 – 798 H-2003 (si veda Appendice A).

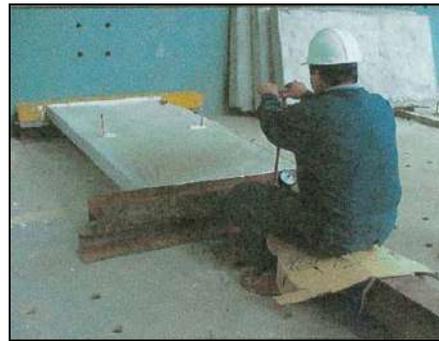
La malta cementizia di rinzafo dei pannelli ha raggiunto una resistenza alla compressione dopo 28 giorni pari a 119 kg/cm<sup>2</sup> (1696 libbre/pollici<sup>2</sup>) su una delle facce e 2429 libbre/pollici<sup>2</sup> sulla seconda faccia, per una media di 145 kg/cm<sup>2</sup> (2062 libbre/pollici<sup>2</sup>). Il carico è stato applicato per mezzo di un martinetto idraulico con manometro di carico di 27215.5 kg (60000 libbre) distribuito sulla sezione trasversale più corta del pannello. Per il collaudo è stato applicato un carico assiale parallelo alla dimensione più lunga del pannello (si veda Figura 3.5 e 3.6). Con questo meccanismo si è riusciti a registrare un carico di 24948 kg (55000 libbre), cercando di misurare le deformazioni perpendicolari al piano.

**Tabella 3.3** – Risultati della prova di compressione dei pannelli

Campione	Spessore	Deformazione	Carico		Osservazioni
	cm		cm	Kg	
PSM60-1	6	0	24 947,84	55 000	Non si sono osservate deformazioni perpendicolari al piano
PSM60-2	6	0	24 947,84	55 000	
PSM60-3	6	0	24 947,84	55 000	
PSM80-1	8	0,1	24 947,84	55 000	Si sono osservate leggere deformazioni perpendicolari al piano
PSM80-2	8	0,2	24 947,84	55 000	
PSM80-3	8	0,2	24 947,84	55 000	



**Figura 3.5** – Pannello, filo perimetrale e regoli per la visualizzazione della deformazione a compressione



**Figura 3.6** – Applicazione del carico assiale al pannello.

### 3.1.3 Prova di resistenza alla flessione su pannelli PSM 60 e PSM 80 di luce di 2.13 m (7 piedi)

La prova di resistenza a flessione è stata documentata nella relazione N° 02-798C-2003 e N° 02-798D-2003 (si veda Appendice A). I pannelli sono stati rinziati con malta cementizia avente una resistenza media di 119 kg/cm<sup>2</sup> (1696 libbre/pollici<sup>2</sup>) dopo 28 giorni.

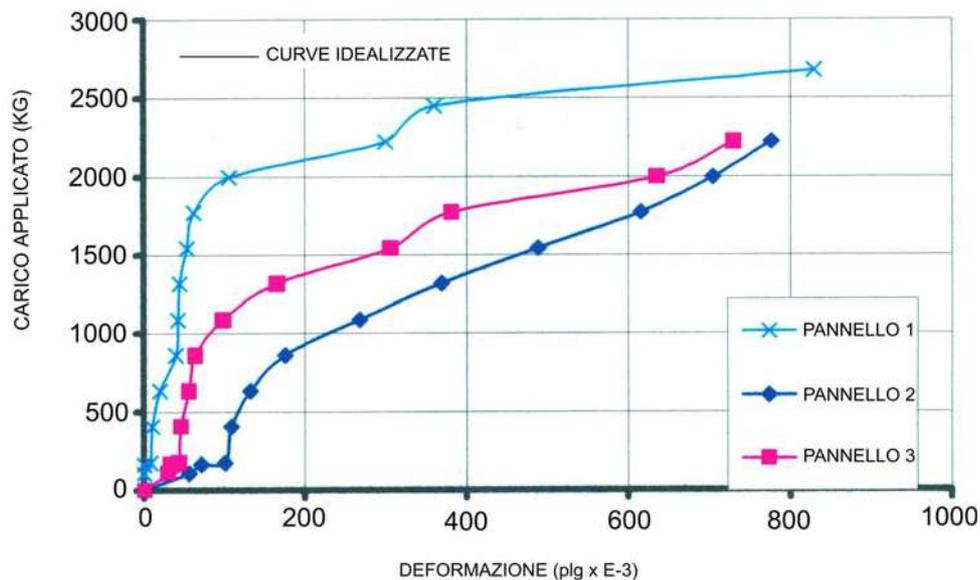
Il carico è stato applicato per mezzo di un martinetto idraulico con manometro di carico di 27215.5 kg (60000 libbre), sommando il carico dovuto agli strumenti. Il carico applicato a L/2 è stato distribuito mediante un elemento di acciaio, di sezione "C", a due elementi collocati a L/4 di ogni lato del pannello. Questi due elementi, saldati ognuno ad una barra solida del diametro di 1 pollice lunga quanto la larghezza del pannello, hanno distribuito il carico come richiesto dalla norma (si veda Figura 3.10).

Sono stati collocati due manometri su entrambe le facce in corrispondenza del centro del pannello per

verificare la deflessione dall'inizio di ogni carico. I dati ottenuti sono stati riportati su due grafici di carico – deformazione per ogni pannello collaudato, considerando una media tra le due deflessioni rilevate dai due manometri (Figura 3.7 e 3.8).

**Tabla 3.4** Resultados de ensayo a flexión para paneles PSM 60

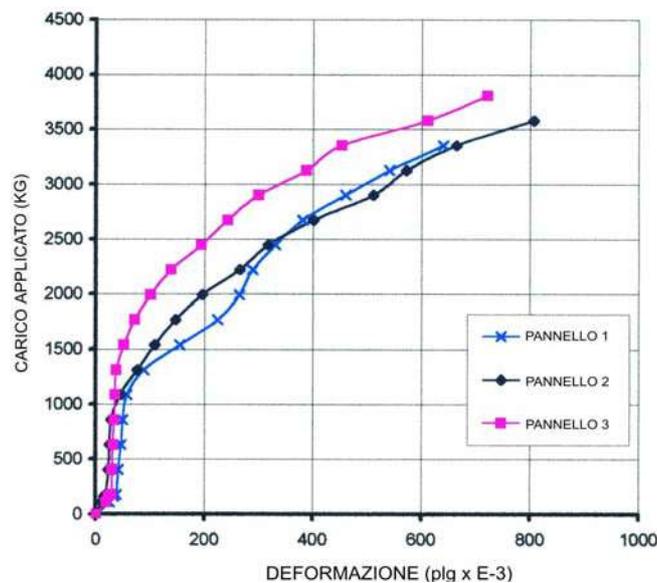
Carico applicato dal martinetto		Carico totale Martinetto + $P_0$	Deflessioni, pollici x E-3		
lb	kg		Pannello I	Pannello 2	Pannello 3
0	0	0	0	0	0
0	108,86	240	0	56,0	30,0
0	164,20	362	0	71,5	33,5
0	176,45	399	8,4	101,0	43,0
500	407,78	899	10,5	109,0	46,5
000	634,58	1 399	20,5	132,0	56,0
500	861,38	1 899	40,0	175,5	64,0
2 000	1 088,18	2 399	42,5	268,0	98,5
2 500	314,98	2 899	44,5	369,5	165,0
3 000	541,78	3 399	54,0	488,5	306,0
3 500	768,57	3 899	62,5	615,5	382,0
4 000	1 995,37	4 399	106,0	704,5	635,0
4 500	2 222,17	4 899	300,0	777,0	730,5
5 000	2 448,97	5 399	360,0		
5 500	2 675,77	5 899	830,0		
6 000	2 902,57	6 399			
6 500	3 129,36	6 899			
7 000	3 356,16	7 399	Rottura	Rottura	
7 500	3 582,96	7 899			Rottura



**Figura 3.7** – Grafico carico – deformazione per il pannello PSM 60 sottomesso a flessione

**Tabella 3.5 – Risultati della prova di resistenza alla flessione dei pannelli PSM 80**

Carico applicato dal martinetto		Carico totale Martinetto +P <sub>0</sub>	Deflessioni, pollici x E-3		
lb	kg		lb	Pannello 1	Pannello 2
0	0	0	0	0	0
0	108,86	240	26,0	11,5	19,0
0	164,20	362	33,0	15,5	23,0
0	180,98	399	38,5	18,5	29,0
500	407,78	899	42,0	23,0	30,0
1 000	634,58	399	47,0	25,0	32,0
1 500	861,38	899	49,5	28,0	34,0
2 000	1 088,18	2 399	57,5	44,5	36,0
2 500	1 314,98	2 899	89,0	76,0	38,0
3 000	541,78	3 399	155,5	109,0	52,0
3 500	768,57	3 899	224,5	147,5	71,5
4 000	995,37	4 399	264,5	196,5	100,5
4 500	2 222,17	4 899	289,0	265,5	138,5
5 000	2 448,97	5 399	331,0	317,5	194,0
5 500	2 675,77	5 899	381,5	401,0	242,5
6 000	2 902,57	6 399	460,5	511,5	300,0
6 500	3 129,36	6 899	541,0	572,0	387,5
7 000	3 356,16	7 399	640,0	664,5	453,0
7 500	3 582,96	7 899	Rottura	806,5	611,5
8 000	3 809,76	8 399			721,0
8 500	4 036,56	8 899			Rottura
9 000	4 263,36	9 399		Rottura	



**Figura 3.8 – Grafico carico – deformazione per il pannello PSM 80 sottoposto a flessione.**

Il momento corrispondente al pannello dovuto alle forze esterne, si definisce come segue:

$$M = \frac{P \times L}{8}$$

Dove P è il carico applicato ed L è la lunghezza del pannello tra gli appoggi. Il momento per unità di lunghezza si ottiene dividendo il momento per la larghezza dello stesso cioè:

$$M_{unitario} = \frac{P \times L}{8 \times b}$$

Nelle Figure 3.7 e 3.8 si mostra il comportamento idealizzato proposto per i pannelli sottoposti a flessione, nel quale si propone un punto di deformazione. Nella Tabella 3.6 si riportano i valori del momento nel limite elastico e il momento massimo determinato con la formula precedente.

**Tabella 3.6** – Capacità massima a flessione registrata dai pannelli, con luce di 2.13 m (7 piedi).

Campione	Spessore	Limite elastico		Capacità massima	
	cm	Carico (Kg)	Momento (kg-m/m)	Carico (Kg)	Momento (kg-m/m)
PSM60-1	6	1815	436	3356,16	807
PSM60-2	6	910	218	3356,16	807
PSM60-3	6	1 245	300	3 582,96	861
PSM80-1	8	1 815	436	3 582,96	861
PSM80-2	8	1 815	436	4 263,36	1 025
PSM80-3	8	2 270	545	4 036,56	970

Un parametro importante nella progettazione è lo sforzo di deformazione  $\sigma_y$ , per il comportamento a flessione.

Questo sforzo si può associare al momento di deformazione  $M_y$  in questa maniera:

$$\sigma_y = \frac{M_y C}{I}$$

Dove

C: distanza dell'asse neutro dalla fibra più distante

$M_y$ : momento di deformazione

I: momento di inerzia della sezione del pannello

Pannello PSM 60

$$I = 2 \cdot \left[ \frac{(30mm)^3 \cdot 1000mm}{12} + (45mm)^2 \cdot (30mm \cdot 1000mm) \right] = 1.2153E + 08mm^4$$

Pannello PSM 80

$$I = 2 \cdot \left[ \frac{(30\text{mm})^3 \cdot 1000\text{mm}}{12} + (55\text{mm})^2 \cdot (30\text{mm} \cdot 1000\text{mm}) \right] = 1.86E + 08\text{mm}^4$$

Nel valutare questi parametri si ottengono diversi valori di sforzo di deformazione per uno stesso pannello. Queste variazioni dipendono, fra gli altri fattori, dalla variazione della resistenza del cemento utilizzato. Per questa ragione si indicano nella Tabella 3.7 ranghi di valori fra i quali si trova lo sforzo di deformazione dei campioni collaudati.

**Tabella 3.7** – Sforzo di deformazione per il comportamento a flessione dei pannelli

Pannello	Sforzo di deformazione (Kg/cm <sup>2</sup> )		
	Massimo	Minimo	Medio
PSM60	21,5	10,8	15,7
PSM80	20,5	16,6	17,8

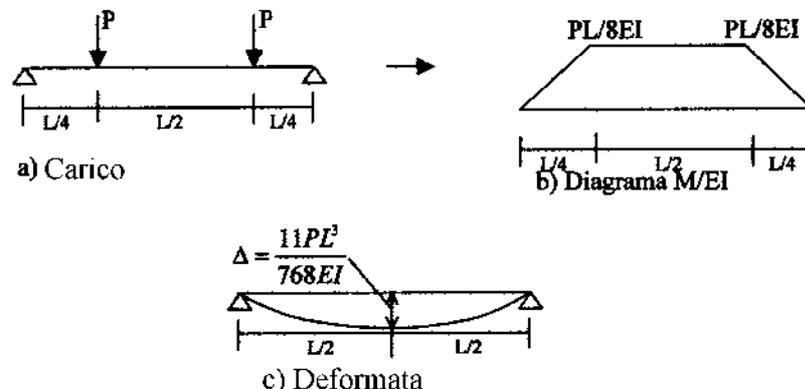
Di questi valori, utilizzando il valor medio per entrambi i tipi di pannelli e un fattore di sicurezza pari a 1.5 si può proporre lo sforzo tollerabile per gli elementi sottomessi a flessione come segue:

$$\sigma_{tollerabile} = \frac{(\sigma_{y-PSM60} + \sigma_{y-PSM80})/2}{FS} = \frac{(15.7\text{kg/cm}^2 + 17.8\text{kg/cm}^2)/2}{1.5} = 11.2\text{kg/cm}^2$$

Confrontando questo sforzo tollerabile con la resistenza a compressione del cemento utilizzato si può evidenziare la seguente relazione:

$$\sigma_{tollerabile} \approx 0.094 f'_c$$

Per la realizzazione del modello di questo sistema costruttivo descritta nel paragrafo 3.2 è importante conoscere la rigidità a flessione dei pannelli. Mediante il modello matematico si analizza il comportamento dei pannelli nel rango elastico, pertanto per ogni pannello è necessario determinare la rigidità iniziale. Nelle Figure 3.7 e 3.8 si mostra il comportamento elastico ideale per ogni pannello sottomesso a collaudo.



**Figura 3.9** – Schema per la determinazione della rigidità a flessione dei pannelli

Per determinare la rigidità è stato analizzato il modello mostrato nella Figura 3.9 e mediante il metodo di area – momento si è ricavata la seguente equazione:

$$\Delta = \frac{11PL^3}{768EI}$$

dove:

- $\Delta$  è la deformazione nel punto medio del pannello
- P è il carico applicato
- L è la lunghezza del pannello tra gli appoggi
- EI è la rigidità a flessione del pannello

Dalla prova realizzata possiamo ottenere valori per  $\Delta$  e P che soddisfino il comportamento elastico ideale proposto e di conseguenza, ricavandola dall'equazione sopra, determinare la rigidità a flessione. Nella Tabella 3.8 si mostrano i valori determinati mediante questo procedimento.

**Tabella 3.8** – Calcolo della rigidità a flessione dei pannelli

PANNELLO	$\Delta$ (plg E-03)	A (mm)	P (Kg)	EI (kg-mm <sup>2</sup> )
PSM 60-1	42,5	1,08	1088,2	1,99E+11
PSM 60-2	132,0	3,35	634,6	3,75E+10
PSM 60-3	56,0	1,42	634,6	8,85E+10
PSM 60 <sub>(medio)</sub>	-	-	-	1,08E+11
PSM 80-1	57,6	1,46	1088,2	1,48E+11
PSM 80-2	44,5	1,13	1088,2	1,91E+11
PSM 80-3	36,0	0,91	1088,2	2,37E+11
PSM 80 <sub>(medio)</sub>	-	-	-	1,92E+11

Agli effetti della modellazione dei pannelli è necessario stabilire uno spessore equivalente di sezioni di cemento della seguente maniera:

Il momento di inerzia della sezione equivalente è:

$$I = \frac{bxh^3}{12} = \frac{1110 \text{ mm} * (t_{equivalente})^3}{12} = 92.5 \text{ mm} * (t_{equivalente})^3$$

Il modulo di elasticità del cemento utilizzato nei pannelli è:

$$E_m = 15100 \times \sqrt{118.7 \text{ kg/cm}^2} = 164514 \text{ kg/cm}^2 = 1645 \text{ kg/mm}^2$$

allora:

$$EI = 1645 \text{ kg/mm}^2 \times 92.5 \text{ mm} \times (t_{\text{equivalente}})^3 = 152163 \text{ kg/mm} \times (t_{\text{equivalente}})^3$$

Per PSM 60

$$EI = 1.08E+11 \text{ Kg} - \text{mm}^2 = 152163 \text{ Kg/mm} \times (t_{\text{equivalente}})^3 \Rightarrow t_{\text{equivalente}} = 89.2 \text{ mm}$$

$$t \approx 9 \text{ cm}$$

Per PSM 80

$$EI = 1.92E+11 \text{ Kg} - \text{mm}^2 = 152163 \text{ Kg/mm} \times (t_{\text{equivalente}})^3 \Rightarrow t_{\text{equivalente}} = 108.1 \text{ mm}$$

$$t \approx 11 \text{ cm}$$



**Figura 3.10** – Installazione del sistema di carichi per la prova a flessione



**Figura 3.11** – Incrinatura a un quarto della lunghezza del pannello durante la prova a flessione

### 3.1.4 Prova sui collegamenti

Per verificare la resistenza dei collegamenti utilizzati nel sistema di pannelli M2 sono stati testati collegamenti piani e ad L come unione fra pannelli PSM 60 e pannelli PSM 80. Questa prova è stata documentata dalla relazione N° 02-798G-2003 (si veda Appendice A). Il cemento utilizzato per rinzaffare i pannelli e i collegamenti ha avuto una resistenza dopo 28 giorni pari a 119 kg/cm<sup>2</sup> (1696 libbre/pollici<sup>2</sup>) su una faccia e 170.8 kg/cm<sup>2</sup> (2429 libbre/pollici<sup>2</sup>) sull'altra.

Per i collegamenti piani sono stati utilizzati moduli di 0.55 m (21 5/8 pollici) di larghezza per 0.80 m (31 1/2 pollici) di altezza e per i collegamenti ad angolo moduli angolari di 0.49 m (19 1/4 pollici) per 0.64 m (25 3/4 pollici) per 0.80 m (31 1/2 pollici) di altezza (si veda Figura 3.12). Il carico è stato applicato per mezzo di un martinetto idraulico con manometro di carico pari a 27215,5 kg (60000 libbre), posizionato su un angolo del pannello, mantenendo il lato opposto incastrato.

Per questa prova è stata delimitata una porzione del pannello mentre si applicava la forza nell'estremità opposta. Con questo meccanismo è stato simulato uno dei possibili comportamenti dei collegamenti dentro un'abitazione. Sono stati registrati i carichi massimi che hanno prodotto incrinature (si veda Figura 3.13).

**Tabella 3.9** – Risultati delle prove su collegamenti piani

Campioni	Spessore	Carico		Osservazioni
	cm	Kg	lb	
PSM60-1	10	5000	11 023	I pannelli hanno ceduto al taglio, fuori dal collegamento.
PSM60-2	10	5000	11 023	
PSM60-3	10	5000	11 023	
PSM80-1	13	5000	11 023	I pannelli hanno ceduto al taglio, fuori dal collegamento.
PSM80-2	13	5000	11 023	
PSM80-3	13	5000	11 023	

**Tabella 3.10** – Risultati delle prove su collegamenti angolari

Campioni	Spessore	Carico		Osservazioni
	cm	Kg	lb	
PSM60-1	10	1 587,59	3 500	Difetto nel collegamento interno; distacco del cemento nel collegamento esterno a 3 pollici (7.6 cm) dall'angolo
PSM60-2	10	1 587,59	3 500	
PSM60-3	10	1 587,59	3 500	
PSM80-1	13	1 360,79	3 000	Difetto nel collegamento interno; distacco del cemento nel collegamento esterno a 3 pollici (7.6 cm) dall'angolo
PSM80-2	13	1 360,79	3 000	
PSM80-3	13	1 360,79	3 000	



a) Unione tipica di collegamento piano



b) unione ad angolo

**Figura 3.12** – Unione tra pannelli



**Figura 3.13** – Difetto tipico del collegamento angolare con carico pari a 1591 kg (3500 libbre)

### 3.2 Prova su abitazione

Per testare il comportamento dei pannelli M2 come sistema strutturale, è stata costruita una casa modello M2 presso il Campus Victor Levi Sasso dell'Università Tecnologica di Panama. Il progetto architettonico, mostrato nella Figura 3.14 e 3.15 è stato realizzato dai tecnici della suddetta Università ed è rappresentativo dell'abitazione tipica panamense.

In questa sezione si presentano le caratteristiche fisiche, il comportamento strutturale ideale (modello matematico) e il comportamento reale della struttura della casa modello M2.