

**Fig. 7.43**, Il grafico di espansività (CRATERre; Houben, Guillaud 1989) indica un grado di espansività debole per il terreno di Pozzolo Formigaro.

Il terreno a disposizione risulta in definitiva un suolo limoso, poco plastico, poco soggetto a rigonfiamenti e fenomeni da ritiro, in virtù di una bassa espansività, quindi scarsa attitudine ad assorbire grosse quantità d'acqua, e con una coesività medio-bassa. Queste ultime proprietà dovrebbero conferirgli una certa resistenza al gelo.

### 7.3 MURI IN TERRA BATTUTA: PRODUZIONE CAMPIONI

Nell'ottica di eseguire prove termiche e capire meglio come possa variare il comportamento termico di murature in terra battuta se accoppiate a pannelli in terra alleggerita, sono stati realizzati muri di prova. Sono state effettuate prove di compattazione Proctor per stabilire il contenuto ottimale d'acqua con cui umidificare la miscela di terra in fase di compattazione perché il muro possa raggiungere la massima densità possibile, date le caratteristiche fisiche e la distribuzione dei grani nel terreno a disposizione. A questo proposito, considerati i risultati delle prove, è stato deciso di realizzare tre muri campione con diverso contenuto d'acqua al momento della compattazione, in modo da poter verificare in sede successiva, se esso abbia una particolare influenza sulle prestazioni termiche del muro una volta completamente essiccato. Per la realizzazione dei muri campione sono stati progettati e costruiti in laboratorio casseri smontabili in legno ed è stato studiato un apposito pestello in ferro per la battitura del terreno, poi realizzato da un fabbro locale.



Fig. 7.44, Lo stampo utilizzato per le prove di compattazione proctor standard è un modello di dimensione piccola, (vedi tabella 7.8).

### 7.3.1 PROVE DI COMPATTAZIONE Proctor Standard

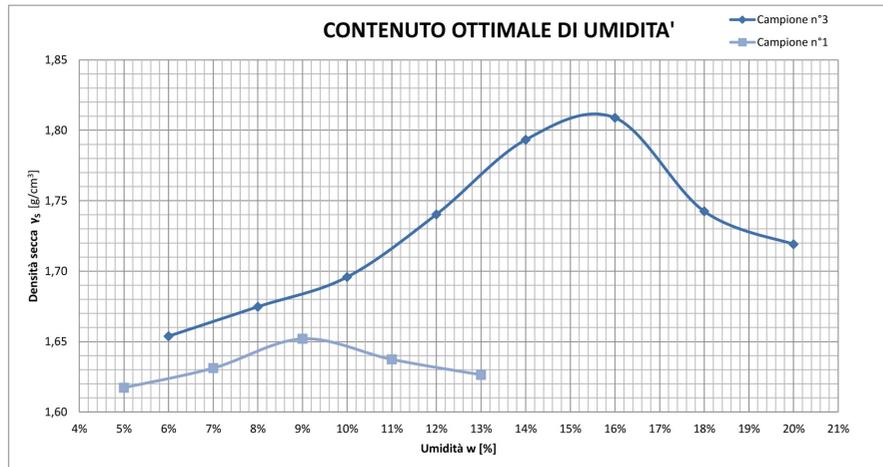
Sebbene generalmente sia indicato in letteratura un contenuto di umidità intorno all'11-12% per la compattazione di muri in terra battuta (Bollini 2013), per determinare il Contenuto Ottimo di Umidità per il terreno di Pozzolo Formigaro, con cui procedere alla compattazione, è stata utilizzata la prova Proctor standard, secondo la normativa di riferimento UNI EN 13286-2:2005, CNR BU 69/73, e AASHTO T265, con la sola variante del peso del pestello di 3,5 kg. La prova consiste nel compattare della terra per strati, in un recipiente metallico cilindrico utilizzando un pestello di dato peso a caduta libera. Il processo viene ripetuto sullo stesso campione di terra, umidificato con percentuali d'acqua progressivamente crescenti del 2% - 3%. A ciascun tasso di umidità corrisponde un valore di densità a secco per il terreno sottoposto alla prova, che viene riportato in un grafico. Per il completamento della prova sono necessari almeno cinque punti, che riportati nel grafico disegnano una curva a campana. Il punto massimo della curva costituisce il massimo valore di densità a secco raggiungibile dal campione di terra, cui corrisponde un tenore d'acqua preciso; quest'ultimo rappresenta la quantità d'acqua ottimale per la miscela di terra testata, in fase di compattazione affinché possa raggiungere il massimo grado di densità a secco possibile.

Uno dei fattori di maggiore impatto sulla densità secca del campione è la distribuzione della dimensione delle particelle ed il contenuto d'acqua corrispondente; Il Contenuto Ottimo di Umidità è fondamentale per ottenere la massima densità secca del campione attraverso una compattazione dinamica, e l'umidità del campione durante la compattazione non dovrebbe mai essere del 3% al di sotto o del 5% al di sopra del Contenuto Ottimo di Umidità (Walker - Maniatidis 2003). In realtà la natura e la forza della compattazione dinamica che viene utilizzata durante la realizzazione di un muro in terra battuta è piuttosto diversa da quella indicata dalla prova, in altri casi ritrovati in letteratura (Hall & Djerbib, 2004) la prova è stata infatti modificata in modo da rispondere meglio ai reali metodi di compattazione, adattando la forza di compattazione al tipo di suolo testato. L'AASHTO propone un ulteriore metodo di compattazione, *Modified Proctor Test*, differenziato dal metodo Standard, per peso e altezza di caduta del pestello e per numero di strati in cui il materiale viene compattato. Nel nostro caso non sono state possibili modifiche, per cui è stato deciso di affidarsi alla metodologia standard utilizzando stampo piccolo delle dimensioni indicate dalla normativa (Cancellieri 2008).

Modalità di compattazione Standard			3 strati
			25 colpi
Dimensioni Pestello		Dimensioni Stampo	Piccolo
Peso [Kg]	2,495	Diametro interno [mm]	101,6
Diametro [mm]	51	Altezza interna [mm]	116,4
Altezza caduta [mm]	305	Altezza caduta [mm]	51,0

**Tabella 7.8,** Modalità di compattazione per la prova Proctor e caratteristiche degli strumenti utilizzati.

I campioni di terra su cui realizzare le prove sono stati scelti con il metodo della quartatura; dei tre campioni analizzati, solo due hanno permesso di completare sul grafico la curva a campana necessaria all'individuazione del valore di massima densità a secco. Il problema è stato con tutta probabilità dovuto ad un periodo di raffreddamento insufficiente del campione di terra in seguito all'essiccazione; essendo ancora calda la terra, l'acqua aggiunta gradualmente è evaporata velocemente, restituendo valori di umidità falsati durante la prova.



**Fig. 7.45,** Il grafico mostra le curve ottenute dalle prove Proctor Standard per i campioni di suolo 1 e 3. I risultati individuano il massimo valore di densità secca raggiungibile per contenuti d'acqua rispettivamente del 9% e 15,5%



**Fig. 7.46-7.47,** Prova proctor: la terra essiccata viene sminuzzata con un martello di gomma e passata al setaccio da 5mm.



**Fig. 7.48,** Prova Proctor: il campione di terra scelto viene umidificato progressivamente con quantità d'acqua del 2-3%.



Fig. 7.49, Prova Proctor: lo stampo viene riempito per strati ed ognuno di essi viene compattato con il pestello, con 25 colpi.



Fig. 7.50, Prova Proctor: terminata la compattazione viene rimosso lo stampo ed eliminata la porzione di terra in eccesso.

Il primo campione ha restituito un valore di massima densità a secco di  $1,654 \text{ g/cm}^3$ , per un tenore di umidità del 9%; sebbene l'andamento della curva granulometrica indichi si tratti di un terreno limoso poco plastico, e quindi non in grado di assorbire grosse quantità d'acqua, il valore di densità massima raggiunto durante la prova Proctor appare troppo basso. È stato deciso quindi di effettuare altre prove. Il test effettuato sul terzo campione di terra ha dato risultati in controtendenza con il primo; Il massimo valore di densità in fase di compattazione è risultato di  $1,812 \text{ g/cm}^3$  per un tenore d'acqua del 15,5%.

#### Campione di prova 1

Capsula	% Acqua	Peso LU [g]	Peso LS [g]	P Rec [g]	$w_i$ [%]	$w_i$ [%]	$w_i$ [g]	$M_{T,i}$ [g]	$\gamma_{s,i}$ [g/cm <sup>3</sup> ]
1.1	3%	98,04	95,47	2,19	<del>2,76</del>	2,77	0,0277	5246	1,64
1.2		97,15	94,58	2,19	2,78				
2.1	5%	36,6	35,29	2,19	<del>3,96</del>	3,97	0,0397	5242	1,62
2.2		28,79	27,77	2,19	3,99				
3.1	7%	36,24	34,5	2,19	<del>5,39</del>	5,42	0,0542	5278	1,63
3.2		40,22	38,25	2,19	5,46				
4.1	9%	54,2	50,99	2,18	<del>6,58</del>	6,66	0,0666	5318	1,65
4.2		57,39	53,9	2,18	6,75				
5.1	11%	16,51	15,49	2,19	<del>7,67</del>	7,75	0,0775	5320	1,64
5.2		34,03	31,72	2,19	7,82				
6.1	13%	20,75	19,48	2,18	<del>7,34</del>	7,17	0,0717	5300	1,63
6.2		14,26	13,47	2,18	7,00				
7.1	15%	29,34	28,06	2,19	<del>4,95</del>	4,90	0,0490	5268	1,63
7.2		31,85	30,48	2,19	4,84				

Dim.	d [cm]	h [cm]	V [cm <sup>3</sup> ]	T [g]
Stampo	10,16	11,64	943,21	3656

Tabella 7.9, Analisi dati prova Proctor standard per campione di terra 1

Campione di prova 3									
Capsula	%Acqua	Peso LU [g]	Peso LS [g]	P Rec [g]	$w_i$ [%]	$w_i$ [%]	$w_i$ [g]	$M_{T_i}$ [g]	$\gamma_{s,i}$ [g/cm <sup>3</sup> ]
1.1	6%	49,96	48,9	30,87	5,88	5,91	0,0591	5332	1,65
1.2		45,61	44,74	30,08	5,93				
2.1	8%	46,7	45,52	30,25	7,73	7,75	0,0775	5382	1,67
2.2		43,35	42,29	28,65	7,77				
3.1	10%	61,81	59,21	31,28	9,31	9,29	0,0929	5428	1,70
3.2		51,33	49,45	29,15	9,26				
4.1	12%	26,87	24,45	2,19	10,87	11,00	0,1100	5502	1,74
4.2		17,15	15,65	2,17	11,13				
5.1	14%	28,49	25,55	2,18	12,58	12,69	0,1269	5586	1,79
5.2		21,58	19,38	2,18	12,79				
6.1	16%	36,74	32,41	2,17	14,32	14,41	0,1441	5632	1,81
6.2		29,03	25,63	2,18	14,50				
1	18%	28,96	25,22	2,19	16,24	16,34	0,1634	5592	1,74
2		22	19,21	2,23	16,43				
2.1a	20%	32,81	28,27	2,18	17,40	17,67	0,1767	5588	1,72
2.2a		30,25	25,98	2,18	17,94				

Dim.	d [cm]	h[cm]	V [cm <sup>3</sup> ]	T [g]
Stampo	10,16	11,64	943,21	3680

**Tabella 7.10**, Analisi dati prova Proctor standard per campione di terra 3

Si è deciso allora di realizzare tre campioni di muro con diverso tenore d'acqua al momento della compattazione; i primi due seguendo le indicazioni fornite dalle prove, ed un terzo utilizzando la quantità d'acqua indicata in letteratura per le costruzioni in terra battuta, intorno al 12%.

Il buon esito della prova è fortemente legato all'esperienza dell'operatore, ma, anche nel migliore dei casi, i margini di errore sono piuttosto alti; inoltre, a parità di suolo, in letteratura è stato registrato uno scarto anche del 4% - 5% tra i risultati ottenuti con la modalità di prova Proctor Standard e la Proctor modificata, dove la procedura modificata indica valori minori di Contenuto Ottimo di Umidità per la compattazione. Probabilmente la



*Fig. 7.51-7.52, Prova Proctor: il cilindro compattato liberato dallo stampo viene tagliato al centro in modo da poter asportare un campione di cui verificare il contenuto reale di umidità.*



*Fig. 7.53, Prova Proctor: il campione da pesare ed essiccare viene asportato da una delle due superfici tagliate.*



*Fig. 7.54, Costruzione casseri: montaggio del piano di supporto con doppia altezza per facilitare la messa in bolla degli elementi laterali.*



*Fig. 7.55, Costruzione casseri: Gli assi laterali sono più lunghi per permettere il fissaggio con barre filettate.*

differenza è dovuta all'energia di costipamento molto più elevata, oltre 4 volte superiore (Facciorusso, Madiai, Vannucchi 2007), impiegata durante questa prova rispetto a quella standard. Secondo le norme Neozelandesi (NZS 4298:1998), inoltre, il contenuto d'acqua utilizzato per l'umidificazione della miscela di terra non dovrebbe mai essere più del 3% al disotto o del 5% al di sopra del Contenuto Ottimo di Umidità ricavato con il Proctor test. Considerando le percentuali di umidità con cui generalmente la miscela di terra viene compattata, i margini di incertezza prospettati sembrano sproporzionati.

### 7.3.2 STRUMENTI PER LA COMPATTAZIONE

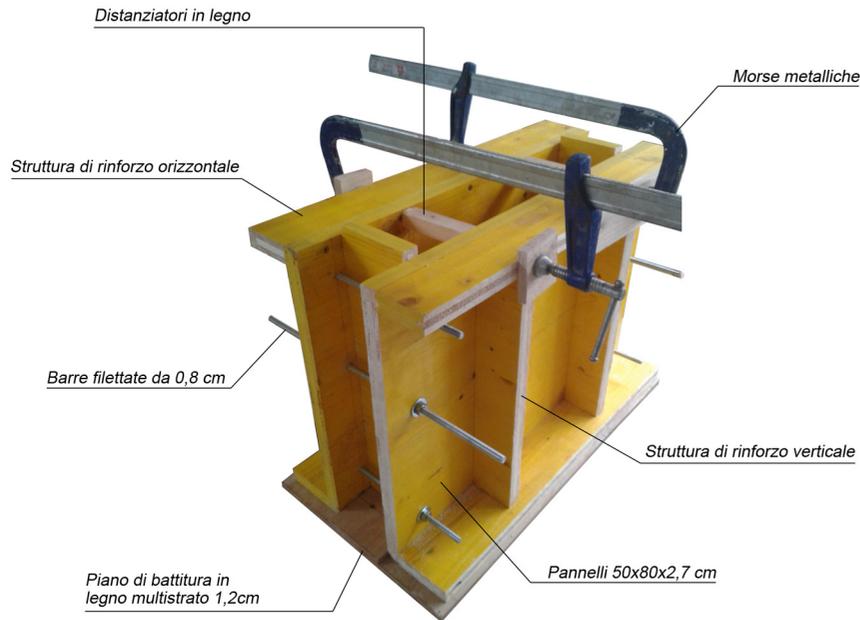
Basandosi su dati reperiti in letteratura e sull'esperienza di costruzione in terra battuta, realizzata in Messico per la direzione di un cantiere per la costruzione di un edificio in terra (Pennacchio - Nicchia 2013), e in occasione di workshop pratici presso all'Univeristat Politecnica de Valencia e presso CRAterre, sono stati progettati appositi casseri per la realizzazione dei muri di prova in terra battuta.

La struttura dei casseri riprende i sistemi di cassetteria in legno utilizzati anticamente per la terra battuta, rivisitandoli in chiave contemporanea e prendendo spunto anche da sistemi di matrice industriale, maggiormente utilizzati oggi per la costruzione di murature in terra battuta. Per la struttura sono stati utilizzati pannelli multistrato del tipo usato per le casseforme da calcestruzzo di 2,7 cm di spessore, e superficie di 50x80 cm. Su questi viene avvitata una struttura di supporto orizzontale, realizzata con doghe in legno da 10x80 cm e 8x80 cm, rispettivamente alla base e alla sommità dei pannelli. Un ulteriore rinforzo verticale è costituito da 4 assi in legno 8x47 cm, avvitati ai pannelli principali a 20 cm dagli estremi. I casseri sono ammortati mediante barre filettate poste ai due estremi. I pannelli di chiusura sul lato corto sono mantenuti a pressione con l'aiuto di cunei per evitare che possano muoversi durante la costipazione.

Il piano di battitura, in multistrato da 1,2 cm, è dotato di una fascia di altezza doppia, dello spessore del muro di prova, in modo da costituire appoggio per i casseri e contribuire a mantenere lo spessore del muro desiderato nella zona inferiore; lo spessore del muro nella fascia superiore è assicurato con distanziatori in legno in corrispondenza dei quali i pannelli sono tenuti in pressione attraverso delle morse. I casseri sono ammortati al piano di battitura tramite bullonatura, in modo da evitare che in fase di compattazione la pressione di terreno provochi il sollevamento del

cassero rispetto alla base.

La struttura di rinforzo evita che i casseri possano deformarsi nelle zone centrali sotto la pressione del terreno costipato all'interno, garantendo in questo modo il piombo delle facciate dei muri campione da realizzare; gli elementi orizzontali, in particolare, permettono di ripartire equamente la pressione esercitata dalle morse.



**Fig. 7.56.** Sistema di cassero progettato per la realizzazione dei campioni di muro in terra battuta. I casseri sono serrati con barre filettate e bulloni; l'uso di morse e distanziatori permette di mantenere lo spessore desiderato su tutto lo sviluppo del cassero.

Le operazioni di montaggio, smontaggio e messa in bolla dei casseri risultano rapide e di facile esecuzione, inoltre, modificando le dimensioni del piano di battitura e dei pannelli di chiusura delle teste del muro, è possibile produrre campioni di diverso spessore. Una volta montati, i casseri risultano piuttosto pesanti, per campioni di dimensioni maggiori si potrebbe considerare l'opportunità di un sistema realizzato con materiali più leggeri.



**Fig. 7.57-7.58.** Costruzione casseri: le assi di testa vengono bloccate per mezzo di cunei in legno.



**Fig. 7.59.** Costruzione casseri: le assi principali dei casseri sono rinforzate con elementi verticali ed orizzontali per evitare spaccamenti in fase di compattazione.

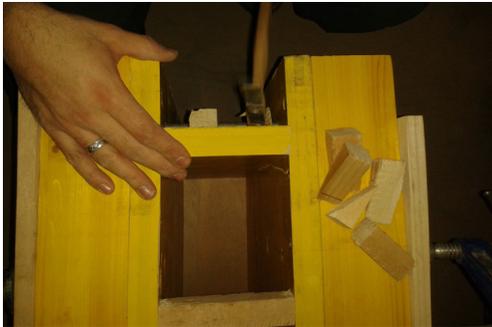


Fig. 7.60-7.61, realizzazione muri campione in terra battuta: i casseri sono avvitati alla base per evitare che possano muoversi verso l'alto durante la compattazione. le assi in testata sono bloccate con cunei in legno.



Fig. 7.62, Realizzazione muri campione in terra battuta: la terra viene compattata per strati di 10 cm con il pestello in ferro.

### 7.3.3 MURI DI PROVA IN TERRA BATTUTA: Compattazione

A causa di limiti imposti dalle dimensioni dell'apparecchio per i test temici da eseguire in seguito, e per ragioni di trasportabilità, si è deciso di realizzare il campione di muro con spessore ridotto a 12cm. Proprio in virtù dello spessore ridotto dei campioni, dalla composizione granulometrica del terreno sono stati eliminati gli inerti con diametro superiore a 13 mm, passando la terra ad un setaccio realizzato per l'occasione con maglia metallica del suddetto diametro.

Per ciascun muro realizzato, delle dimensioni di 50 x 50 x 12 cm, sono stati impiegati circa 50 kg di terra essiccata in forno a ventilazione forzata, per 24h alla temperatura di  $105 \pm 5$  °C. In seguito all'essiccazione, il terreno è stato sminuzzato con un martello di gomma in modo da separare i grani. Il terreno essiccato è stato lasciato a raffreddare durante la notte, coperto da un telo in plastica in modo da evitare che potesse assorbire umidità.

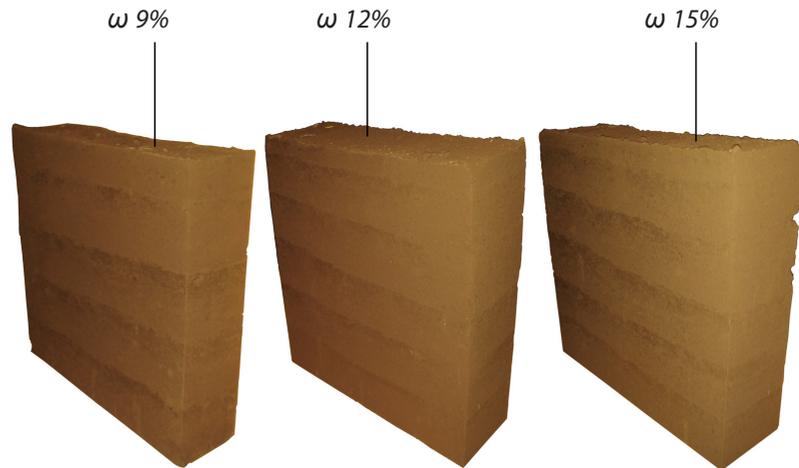


Fig. 7.63, Campioni di pareti in terra battuta a diverso contenuto di umidità in fase di compattazione realizzati. I campioni hanno dimensione 50x49x12 cm

I muri campione realizzati sono tre, con contenuti d'acqua  $\omega$  del 15%, 12% e 9%, secondo le percentuali indicate dal Proctor test per il primo e il terzo campione e dalla letteratura per il campione con  $\omega = 12\%$  (Bollini 2013, Le Tiec - Paccoud 2006), che corrisponde inoltre alla media del contenuto d'acqua degli altri due. La quantità di terreno necessaria alla compattazione di ciascun muro è stato posto in una vasca in plastica ed umidificato con

il quantitativo d'acqua designato, utilizzando un diffusore a spruzzo, e rivoltando la terra continuamente con una cazzuola, in modo da ripartire l'acqua equamente all'interno della terra ed evitare la formazione di grumi. Terminata l'operazione, la terra è stata lasciata a riposo per 1h, in modo lasciare il tempo necessario all'attivazione delle argille.

La compattazione del terreno umidificato all'interno delle casseforme, precedentemente preparate avviene a mezzo di un pestello in ferro fatto realizzare appositamente da un fabbro locale. Si è scelto l'uso di un pestello di questo tipo per scelto per fare in modo che le modalità di compattazione in laboratorio fossero il più possibile simili a quelle utilizzate in cantiere, In questo modo i risultati ottenuti possono essere più facilmente trasferibili al contesto di costruzione reale (Hall - Djerbib 2004). Le misure della superficie di base per la battitura studiate in modo da rendere più facile l'operazione, sono di 8 x 12 cm; la base, saldata ad un manico sempre in ferro di 3,5cm di diametro, è rinforzata con 4 alette metalliche. Il peso complessivo del pestello è di 5,5kg.

Affinché i muri campione fossero comparabili è stato previsto un sistema di compattazione ripetibile per tutti e tre i casi. Sono stati costipati per strati da 10 cm, inserendo 15 cm di materiale per volta all'interno del cassero; il pestello è stato fatto cadere liberamente da un'altezza di 35 cm circa, battendo 145 colpi per strato, distribuiti equamente sulla superficie del muro, per tutti 50 cm della lunghezza del cassero, facendo in modo da compattare prima i bordi in modo da fortificarli, e successivamente la zona centrale.

Una volta liberati dai casseri, i muri sono stati lasciati ad essiccare in laboratorio per 60 giorni in ambiente asciutto chiuso, garantendo ventilazione occasionale per evitare che i muri potessero produrre muffe durante il processo.

Terminato il periodo di essiccazione i muri sono stati trasferiti al laboratorio DENERG (vedi se ha un nome specifico), dove sono stati pesati prima di essere sottoposti a prove termiche in piastra calda.

A causa di una debole resistenza meccanica, non si è riusciti a realizzare le prove termiche sul muro a contenuto di umidità del 9% e per ragioni di tempo non è stato possibile realizzarne un altro. Le prove termiche sono state effettuate solo sui campioni di contenuto umido del 12% e del 15%. Si ritiene in ogni caso che il campione con  $\omega$  9% fosse il meno rappresentativo, in base ai risultati di densità a secco massima piuttosto



*Fig. 7.64, Realizzazione muri campione in terra battuta: i bulloni vengono allentati prima di rimuovere i cunei durante lo smontaggio dei casseri per evitare tensioni sui campioni.*



*Fig. 7.65-7.66, I campioni vengono liberati dalle assi principali mantenendo le assi di testata a protezione degli angoli.*



Fig. 7.67, Uno dei campioni realizzati, pronto per l'essiccazione.

bassi, osservati durante la prova Proctor.

Campioni parete in terra battuta				
Contenuto d'acqua iniziale	Dimensioni [cm]	Terra impiegata [Kg]	Peso secco [Kg]	Densità a secco [Kg/m <sup>3</sup> ]
9%	49x50x12	52,500	X	X
12%	49x50x12	52,500	47,570	1573
15%	49x50x12	52,500	48,124	1645

**Tabella 7.11**, Caratteristiche fisiche dei campioni in terra battuta realizzati in laboratorio.

## 7.4 PANNELLI IN TERRA ALLEGGERITA

Utilizzando le fibre scelte sul territorio piemontese, sono stati realizzati pannelli in terra alleggerita da utilizzarsi per l'isolamento di pareti in terra battuta. Ne saranno poi definite le caratteristiche e le prestazioni termiche accoppiati ai muri di prova in terra battuta costruiti in precedenza in laboratorio. I pannelli sono stati realizzati con due diverse percentuali di componente fibrosa e terrosa, in modo da poter successivamente analizzare come varia il comportamento termico associato ai muri in terra battuta al variare delle percentuali delle due componenti.

Prima di procedere alla realizzazione dei pannelli in terra-fibra, sono state effettuate prove tese ad individuare valide proporzioni di componente fibrosa e terra, utili ad affinare la composizione della miscela da utilizzare.

### 7.4.1 PROVE SULLA COMPONENTE LEGANTE

Le prove sono state eseguite presso *Laboratoire CRAterre*, utilizzando il *Poligono del Giappone* raccolto sul sito di cantiere a Pont de Veyle, per la porzione fibrosa.

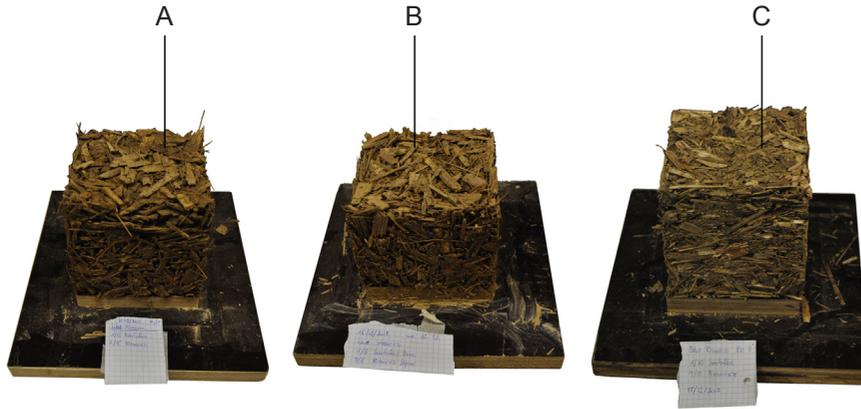
A questo scopo, sono stati realizzati campioni in terra alleggerita di dimensioni 10 x 10 x 10 cm, con diverse proporzioni di terra e fibra, in modo da verificare la capacità dei provini di resistere al proprio peso e la compatibilità delle fibre con il legante a base di terra, controllando che non presenti marcescenze dopo un ciclo completo di essiccazione e l'esposizione prolungata all'aria. A partire da peso e volume è stata calcolata la densità a secco dei campioni, e utilizzando le tabelle in Volhard

(Volhard 1995), ne è stata calcolata la conduttività attesa.

Come legante è stata preparata una barbottina a base di terra ed acqua in proporzioni 1:1; per la componente terrosa sono stati sciolti in acqua mattoni estrusi realizzati a *CRAterre* con un terreno particolarmente ricco in argilla.

I campioni in terra alleggerita sono stati realizzati con le seguenti proporzioni:

- A. 1 parte di barbottina (200 ml); 4 parti di fibre (800 ml)
- B. 1 parte di barbottina (125ml); 7 parti di fibre (875 ml)
- C. 1 parte di barbottina (100 ml); 9 parti di fibre (900 ml)



**Fig. 7.71**, *Campioni in terra alleggerita con Renouée du Japon realizzati in laboratorio.*

In un contenitore sono state mescolate le quantità di materiale necessarie alla realizzazione dei blocchi. Una volta amalgamato con le mani, il composto è stato riversato in appositi casseri in legno di dimensioni 10x10x10 cm, aiutandosi con una spatolina per evitare la formazione di vuoti, e successivamente pressato leggermente, usando la testa in metallo di un piccolo martello. I campioni sono stati lasciati a sedimentare per 12h, quindi sono stati liberati dalle casseforme, pesati ed essiccati in forno, ad una temperatura costante di 52 °C per circa 10h. Una volta asciutti, i campioni sono stati ripesati e ne sono stati calcolati densità a secco e conducibilità termica attesa.



**Fig. 7.68**, *Barbottina di terra preparata per preparare i campioni.*



**Fig. 7.69-7.70**, *Gli ingredienti vengono mescolati in un contenitore e poi riversati nei casseri.*



Fig. 7.72, L'impasto viene leggermente compattato all'interno del cassero utilizzando la testa di un piccolo martello.



Fig. 7.73, Il campione viene pesato dopo l'essiccazione in forno.

I risultati ottenuti sono riassunti nella tabella di seguito:

Prove sui leganti per componenti edilizi in terra fibra					
Campione	Proporzioni	Dimensioni [cm]	Peso Secco [g]	Densità a secco [Kg/m <sup>3</sup> ]	Conducibilità $\lambda$ [W/mK]
A	1:4	10x10x9,1	401,38	440	0,13
B	1:7	10x10x7,4	239,44	290	0,1
C	1:9	10x10x10	250,87	250	0,1

**Tabella 7.12**, Risultati delle prove sui leganti realizzate al laboratoire CRAterre su tre campioni a diversa proporzione di terra e fibre.

Dei campioni realizzati, il blocco C sembrerebbe avere un livello di coesione insufficiente, la parte superiore in particolar modo appare leggermente friabile. Il blocco B sembra assicurare invece una buona coesione a fronte di un valore di conducibilità termica atteso soddisfacente per gli standard raggiungibili da questo tipo di prodotti edilizi. La densità a secco ottenuta per i campioni B e C, C in special modo, risulta oltre i limiti considerati utili per elementi costruttivi in terra alleggerita; il blocco A dovrebbe raggiungere prestazioni di isolamento termico più basse rispetto agli altri due, ma potrebbe costituire una soluzione che assicuri la necessaria coesione per componenti di spessore più fine, avendo densità più vicina a quelle riportate da Minke per componenti edilizi in terra alleggerita (Minke 2006).

Le caratteristiche risultanti dalle prove dei singoli campioni ed il relativo procedimento di realizzazione sono sintetizzati in tre schede riportate in allegato B.

#### 7.4.2 PANNELLI IN TERRA-FIBRA: Realizzazione

##### Introduzione:

Come accaduto per i muri in terra battuta, a cui dovranno essere accoppiati per le prove, le dimensioni dei pannelli sono state stabilite in relazione all'apparato sperimentale per le misure termiche da eseguire in piastra calda e misurano 50x49x4cm.

##### Percentuali delle componenti scelte per le prove:

In base alle prove sui leganti effettuate al Laboratoire CRAterre, si è ritenuto

di partire con una proporzione 1:3, un volume di terra e tre volumi di fibre per il pannello a più basso contenuto di terra. Dei campioni eseguiti per le prove sui leganti, il blocco C, di proporzioni 1:9, non risultava sufficientemente coeso, mentre il blocco B, di proporzioni 1:7, mostrava risultati di coesione accettabili, ma non adatti alla forma dei pannelli da realizzare che avrebbero avuto spessore molto inferiore e maggiore superficie di sviluppo rispetto ai provini realizzati a CRAterre. In base ai risultati di conducibilità termica attesi, considerando le tabelle in Volhard (Volhard 1995), si è ritenuto più affidabile usare una proporzione vicina a quella testata sul blocco A, 1:4.

I risultati ottenuti dal primo pannello che analizzeremo nel paragrafo seguente, hanno poi indotto ad aumentare il dosaggio della componente terrosa nel definire le percentuali per il secondo pannello di prova. Si è scelto quindi di fare riferimento ai dosaggi utilizzati durante il cantiere a Pont de Veyle per le miscele di preparazione del *Torchis* in terra-paglia applicato sulle pareti in balle di paglia del capanno, dove la componente di fibre era pari a quella terrosa.

#### Composizione della componente terrosa:

La composizione della componente terrosa per la *barbottina* di terra, da utilizzare come legante, è stata scelta tenendo conto dei risultati dell'analisi granulometrica e della caratterizzazione della terra di Pozzolo Formigaro usata per la sperimentazione. La terra contiene un'alta percentuale di limo, che dovrebbe permettere una buona capacità di controllo sul ritiro (Houben - Guillaud 1989), consentendo di utilizzare una miscela con forte componente argillosa e limosa, e ottime capacità leganti, in modo da demandare esclusivamente alle fibre il ruolo di scheletro. La terra è stata quindi passata al setaccio da 0.5 mm, escludendo di fatto la ghiaia, i grani di sabbia media e grossa. Con la terra ricavata dalla setacciatura è stata approntata una *barbottina* di terra, con componente di terra per il 55% ed acqua per il 45%.

Le percentuali sono calcolate in base al volume, considerando come unità di riferimento un volume di 1000 cm<sup>3</sup>; per facilità di calcolo e procedura, per ogni materiale utilizzato sono stati calcolati i pesi dell'unità di volume, in modo da usare un'unità di peso, più comoda, per il calcolo delle quantità da impiegare nell'impasto.

#### Procedura

Il materiale a disposizione in letteratura sulla realizzazione di pannelli



Fig. 7.74, La barbottina di terra è stata realizzata con un miscelatore in combinazione con un trapano.



Fig. 7.75, Volume di riferimento usato per quantificare le proporzioni di materiale nell'impasto.

Pesi per volume dei materiali		
Materiale	Volume [cm <sup>3</sup> ]	Peso [g]
Terra	1000	1116,48
Paglia	1000	76,8
Canapa	1000	113g
Poligono Giappone	1000	150

Tabella 7.13, Pesi per volume dei materiali usati per i pannelli campione.



Fig. 7.76, Casseri in legno di dimensioni 50x49x6cm realizzati per dare forma ai pannelli.

in terra alleggerita a fini di isolamento è molto scarso, praticamente inesistente, per cui il protocollo di preparazione dei campioni è stato definito basandosi su procedure per la messa in opera di tecnologie simili che prevedono l'impiego di una miscela di terra e paglia, come ad esempio il *torchis*. A questo proposito l'esperienza accumulata in cantiere è risultata molto utile.

Ad eccezione delle prove sulla canapa, la cui fibra ha mostrato un comportamento particolarmente complesso, gli altri pannelli sono stati realizzati preparando un composto di fibre e barbotina di terra. Una volta impastata, la miscela è stata trasferita in appositi casseri preparati per l'occorrenza, ed è stata lievemente compattata per strati, esercitando una leggera pressione sull'impasto con un frattazzo rigido per la posa di intonaci. Una volta raggiunto il volume programmato, i pannelli sono stati tenuti a riposo per almeno 24h prima di essere liberati dal cassero ed essiccati definitivamente in forno.

#### *Tempi di realizzazione*

Purtroppo, i tempi lunghi per la vagliatura della terra e la preparazione dei campioni non hanno permesso di realizzare tutti i pannelli previsti, gli esperimenti sulla fibra di canapa sono stati rimandati ad un approfondimento successivo a questo lavoro.

### **Pannelli in terra-paglia**

#### *Taglio della paglia:*

La paglia utilizzata per la produzione dei pannelli in terra alleggerita proviene dalla zona di Vercelli ed è stata fornita da un produttore di riso, che usa generalmente interrirla. Il produttore si è dimostrato interessato a sperimentarne possibilità di impiego alternative.

Le fibre di paglia di riso si sono dimostrate le più facili da lavorare tra le tre utilizzate per la sperimentazione; sebbene i macchinari elettrici provati per il taglio della fibra siano risultati inefficienti, questa è stata facilmente tagliata a fasci con un seghetto, in dimensioni di non più di 4 cm di lunghezza, in modo da essere certi che le fibre rimanessero confinate all'interno del volume del pannello.

#### *Miscelazione del composto:*

La miscelazione del composto a base di terra, acqua e fibre non ha



Fig. 7.77, Casseri in legno di dimensioni 50x49x6cm realizzati per dare forma ai pannelli.

creato particolari difficoltà, le fibre di paglia sono facilmente lavorabili e malleabili; la barbotina di terra è stata distribuita sulle fibre, avendo cura che tutte fossero ben ricoperte dal composto di terra ed acqua per evitare che possano marcire o produrre muffe durante l'essiccazione o una volta realizzato il pannello.

#### *Posa nel cassero:*

Una volta pronto, il composto è stato distribuito nel cassero, dopo averne oleato le superfici interne con un lubrificante, per evitare che il pannello potesse rimanervi incollato durante la fase di essiccazione naturale. Durante la posa il materiale è stato versato e distribuito per strati ed è stata fatta particolare attenzione agli angoli, esercitando su di essi una maggiore pressione con le dita, come accade per la produzione di BTC con la pressa manuale, in modo da renderli più resistenti. Il pannello è stato poi leggermente pressato sempre per strati, con l'aiuto di un frattazzo rigido, al fine di appianarne la superficie e renderla omogenea una volta raggiunto il volume previsto.

Durante la fase di posa in opera, per entrambi i pannelli non si è riusciti a raggiungere lo spessore previsto di 4 cm, nonostante si fosse preparato materiale in eccedenza rispetto a quello calcolato per riempire il volume desiderato. Per il pannello 1:3 è stato preparato 1/8 di materiale in più, mentre per il pannello 1:1, 1/5 di materiale in più.

#### Spessore pannelli allo stato umido:

- pannello 1:3, spessore: 3,4cm
- pannello 1:1, spessore : 3,5 cm

#### *Essiccazione:*

Prima di poter essere liberati dai casseri, i campioni hanno dovuto seccare all'aria in modo da acquisire la rigidità necessaria a mantenere la propria forma. Se il pannello di proporzioni 1:3<sup>12</sup>, avendo un contenuto di terra minore ha potuto seccarsi in 24h in ambiente chiuso, ma periodicamente ventilato, per il secondo pannello di proporzioni 1:1 si è dovuto ricorrere a misure diverse. Il pannello è stato lasciato ad essiccare in ambiente aperto, ventilato per 24h e protetto con un telo di plastica posto ad una certa altezza, in modo da consentire ampia ventilazione del componente, per



Fig. 7.78, Impasto di terra e paglia per pannelli



Fig. 7.79, I pannelli vengono pressati per strati con un frattazzo a superficie piana.



Fig. 7.80, Pannello in terra-paglia di proporzioni 1:3 da essiccare.

<sup>12</sup> La proporzione si riferisce a un volume di terra per tre di paglia di riso.



Fig. 7.81, Pannello in terra-paglia di proporzioni 1:1 in essiccazione.



Fig. 7.82-7.83, Pannello in terra-paglia di proporzioni 1:3 essiccato.

evitare la formazione di muffe. È stato poi lasciato essiccare in ambiente chiuso per altre 48h prima di essere liberato dal cassero e infornato per l'essiccazione completa.

*Pesatura:*

Una volta essiccati, i campioni sono stati pesati in modo da poterne determinare la densità a secco in  $\text{kg/m}^3$ .

- pannello A, proporzioni 1:3, peso a secco: 3,06 Kg
- pannello B, proporzioni 1:1, peso a secco: 5,44 Kg

Ad una prima analisi, il pannello A<sub>p</sub> risulta piuttosto fragile se sottoposto a spostamenti senza avvalersi di una base di supporto. La fragilità non è stata riscontrata tanto negli angoli, come ci si poteva aspettare dai pochi dati trovati in letteratura, quanto piuttosto in alcune zone centrali del pannello che tendono a flettersi e di conseguenza a fratturare. Prove precedentemente condotte in laboratorio, con terra e paglia provenienti dal Perù per realizzare blocchi 10x10x10, avevano dato buoni risultati con quantitativi proporzionali di fibre anche maggiori, ma una maggiore superficie di sviluppo e spessore ridotto di oltre il 50% non supporta evidentemente queste proporzioni. Possibilmente con spessori maggiori, tra i 6 - 8 cm, i risultati potrebbero essere migliori. In alternativa è possibile pensare di utilizzare stabilizzanti nell'impasto di terra o maglie di fibre che rinforzino la resistenza a flessione del componente.

#### Pannelli in terra-paglia

Composizione	Dimensioni [cm]	Materiale usato [Kg]	Peso [Kg]	Densità a secco $\rho$ [ $\text{Kg/m}^3$ ]	Ritiro <sup>1</sup> [cm]	$\lambda$ attesa <sup>2</sup> [W/mK]
1:3	49x50x3,2	5,64	3,06	403	0,3	0,12
1:1	49x50x3,3	12,49	5,44	740	0,3	0,23

**Tabella 7.14**, Caratteristiche fisiche dei pannelli alleggeriti in terra paglia realizzati.

#### Pannelli in terra-poligono del Giappone

*Preparazione della fibra:*

La fibra proviene dalla Francia, ed è stata sminuzzata presso il Laboratoire CRAterre usando un aspiratore/insufflatore da giardino. Sono state eseguite diverse prove alla ricerca di un sistema meccanizzato che permettesse di tritare la fibra di poligono del Giappone, considerando

costosi i macchinari appositi: i mixer elettrici da cucina sono risultati inservibili, poiché le fibre sono troppo resistenti per le lame di cui sono dotati questi apparecchi, inoltre la posizione delle lame stesse, al fondo del recipiente, non permette il contatto con tutte le fibre. È stato testato anche un sistema sperimentale, modificando un taglia-erbe da giardino a spinta su ruote: all'apparecchio sono state asportate le ruote e il sistema di rotazione delle lame ad esse collegato è stato adattato, in modo da poterlo collegare ad un trapano elettrico con cui metterlo in moto, aumentando così sensibilmente la velocità di rotazione. L'espedito non è servito, la fibra riesce a passare nell'interfaccia tra la lama e la copertura, sminuzzandosi solo in alcuni casi. Il sistema risulta però utile per materiali di maggiore spessore e meno flessibili, è stato ad esempio testato con successo con fogli di polistirolo.

Il sistema di triturazione con l'aspiratore/insufflatore non garantisce in ogni caso la dimensione delle fibre. Alcuni pezzi che superavano abbondantemente i 4 cm di lunghezza, sono stati spezzettati a mano.

#### *Miscelazione con barbotina:*

La procedura seguita è stata la medesima utilizzata per i pannelli in terra-paglia; la presenza di foglie mischiate alle fibre ha reso l'amalgama per il pannello a più basso contenuto di terra più pastoso rispetto a quanto ci si aspettasse, ma non ci sono state difficoltà a ricoprire comunque le fibre per proteggerle dal contatto diretto con l'aria.

#### *Posa nel cassero:*

Nel caso del Poligono del Giappone, traendo insegnamento dai risultati dei precedenti pannelli in terra-paglia, si è deciso di modificare le percentuali di composizione di terra e fibra del pannello più leggero. Il pannello B, d'altro canto, risultava avere già peso e densità importanti. Per il pannello C è stata quindi scelta una proporzione di 1:2, un volume di terra e due volumi di fibre, nel tentativo di cercare un compromesso tra prestazioni meccaniche ed esigenze di peso e possibili prestazioni termiche, nonostante questo non lo avrebbe reso comparabile con il pannello A in terra-paglia.

Per la preparazione del pannello è stata aumentata di 1/6 la quantità di composto approntato, in modo da essere davvero sicuri di poter riempire l'intero volume necessario.

#### *Essiccazione:*

L'essiccazione è avvenuta in ambiente chiuso, ventilato naturalmente, per



Fig. 7.84, impasto di terra e fibre di Poligono del Giappone



Fig. 7.85, Pannello in terra alleggerita con fibre di Poligono del Giappone realizzato. Il pannello una volta essiccato non è risultato sufficientemente coeso e resistente.



Fig. 7.86, Fibra di canapa utilizzata per il provino.

24h e successivamente in forno per 48h ad una temperatura di 50 °C. Al termine del processo di essiccazione il pannello si è dimostrato troppo fragile ed ha cominciato a sfaldarsi facilmente, per cui le prove su di esso sono state abbandonate.

### Prove sui pannelli in canapa:

La fibra di canapa utilizzata per le prove proviene dalla coltivazione di Assocanapa a Carmagnola, e si trova allo stato di semilavorato; è stato sottoposto cioè esclusivamente a *stigliatura*, il processo che permette di separare la fibra tecnica della canapa dal canapulo. Da un confronto con Assocanapa, i processi di pettinatura e macerazione della fibra risultano molto costosi per via dei macchinari necessari, per cui si è ritenuto di provare a lavorare con la fibra allo stato più grezzo possibile. La separazione dal canapulo risulta invece necessaria perché è un'operazione che verrebbe eseguita in ogni caso dai produttori, poiché il canapulo ha ormai un mercato importato, anche per l'impiego in edilizia.



I primi esperimenti con la fibra di canapa hanno immediatamente mostrato come si tratti di un materiale differente rispetto alle altre due fibre utilizzate. In principio è stata seguita la medesima procedura utilizzata per paglia e poligono del Giappone, ma allo stato secco la canapa è risultata troppo difficile da mescolare con la barbottina di terra a causa delle maglie di intreccio delle fibre molto fitte. Inoltre la tendenza a gonfiare del materiale impedisce di mantenere la quantità di fibre necessaria alla realizzazione del pannello da 4cm di spessore, all'interno del volume, secondo le proporzioni di riferimento.



Fig. 7.87-7.88, Il provino in terra alleggerita con canapa approntato è risultato troppo basso, la fibra assorbendo l'acqua con cui è stata umidificata si è contratta fortemente

La fibra è stata quindi bagnata, in modo da renderla più morbida e facile da amalgamare con la barbottina di terra ed è stato realizzato un provino di proporzioni 1 volume di terra per tre volumi di fibra, di dimensioni ridotte. La miscela è risultata più facilmente lavorabile, ma l'acqua all'interno delle fibre ne ha ridotto fortemente il volume ed aumentato il fenomeno di ritiro dopo essiccazione. Dopo permanenza in forno alla temperatura di 50°C, per 24 h, lo spessore del provino si attestava su 2,8 cm.

Il provino è risultato compatto, ma ad un rapido test, provando a dividere il pannello con le mani, la componente terrosa si è spezzata facilmente. Il provino ha comunque mantenuto la continuità grazie alla resistenza a trazione delle fibre di canapa, ma ha perso rigidità nel punto di rottura della terra.