

INTRODUZIONE

L'architettura in terra cruda è un patrimonio costruito di elevata consistenza, diversificato per tecniche costruttive e tipologie, che ha avuto ampia diffusione in tutto il mondo, per un periodo di tempo molto ampio (Correia 2006). In Europa e, in particolare, in Italia, ha subito a partire dalla seconda metà degli anni '50 un periodo di declino e di abbandono, riconducibile alla diffusione sul mercato di materiali di origine industriale, che ha dato il via ad una lenta opera di sostituzione edilizia. La perdita dei saperi artigiani legati alle tecniche costruttive in terra cruda insieme a interventi di recupero inappropriati hanno contribuito a mettere a forte rischio la sopravvivenza di un vasto patrimonio testimonianza di una cultura materiale radicata.

Negli ultimi anni, in Europa, l'interesse crescente verso materiali da costruzione di origine naturale sta generando, un nuovo interesse per il materiale terra cruda: l'impiego di materiali da costruzione in terra cruda sta vivendo una fase di riscoperta nell'ambito del mercato della bio-edilizia, anche se nella maggior parte dei casi si tratta di fenomeni limitati ad alcuni contesti locali. In alcune regioni della Francia, in particolare, la recente realizzazione di edifici pubblici di nuova costruzione in terra battuta come *l'espace rural de services de proximités à Marsac-en-Livradois*, sta dando ulteriore impulso a un mercato già in ripresa. In questo contesto, anche la conservazione del patrimonio architettonico e il recupero dei saperi artigiani della tradizione costruttiva assumono un ruolo di primo piano nell'apporto che la costruzione in terra cruda può dare alla società contemporanea, anche in termini di sviluppo sostenibile (Guillaud 2012).

In Italia, nonostante il patrimonio in terra cruda rappresenti poco meno del 15% dell'intero costruito nazionale (A.N.A.H.)¹, la ripresa del mercato non è ancora ai livelli di sviluppo raggiunti in Francia, tuttavia, nelle Regioni in cui il patrimonio costruito in terra è maggiormente diffuso, si registrano segnali positivi.

In Piemonte, dove la tecnica costruttiva della **terra battuta** è largamente diffusa (Bertagnin 1999), la Legge Regionale 2/2006 sulla conservazione e valorizzazione delle costruzioni in terra cruda non ha prodotto i risultati sperati, in parte a causa di sostegni economici inadeguati e della mancanza di strumenti operativi adeguati e di maestranze specializzate, in parte a causa del freno imposto dall'assenza di una normativa nazionale sulla costruzione in terra cruda, che di fatto limita le possibilità di intervento. Anche la normativa nazionale in ambito di adeguamento termico, inoltre, ha contribuito a smorzare gli impulsi di ripresa del mercato della terra cruda e costituisce una difficoltà non banale da superare per chi opera nell'ambito del recupero e della riqualificazione di edifici in crudo. La normativa, infatti, punta principalmente sulle prestazioni di isolamento dell'involucro edilizio nella stagione invernale, per cui la terra battuta ne risulta fortemente penalizzata. Questo materiale ha, infatti, un comportamento termo-igrometrico complesso, influenzato fortemente da trasferimenti di calore e massa di vapore acqueo al suo interno da cui risultano ottime prestazioni di inerzia termica e capacità di regolare la temperatura dell'aria ambiente interna. Queste caratteristiche ne fanno un materiale con forti potenzialità nella riduzione dei consumi energetici per la climatizzazione degli edifici nel periodo estivo, ma con scarsa resistenza termica, in gran parte dovuta all'elevata densità del materiale.

¹ Agence National de l'Habitat; <http://www.anah.fr/>

Obiettivo principale di questo lavoro era lo sviluppo di uno strumento operativo di supporto (sotto forma di linee guida) nella fase di progetto per professionisti e artigiani coinvolti in interventi di recupero e riqualificazione di costruzioni in terra battuta sul territorio piemontese.. Considerata la perdita di saperi legati alle tradizioni costruttive locali, lo strumento è stato integrato da indicazioni riguardanti le basi della tecnica costruttiva nello specifico ambito piemontese. Con il procedere dello studio delle caratteristiche del materiale, della tecnica costruttiva e delle tematiche legate al recupero, alla rifunzionalizzazione e alla riqualificazione delle costruzioni in terra battuta, è risultato di particolare interesse il tema del **comportamento termico e delle tecniche di isolamento con materiali naturali a base di terra e fibre vegetali**, anche nell'ottica di proporre soluzioni tecnologiche appropriate nel tentativo di rispondere alle prestazioni termiche richieste dalla normativa vigente .

La ricerca è stata condotta sviluppando tre linee di ricerca che affrontano:

1 Le caratteristiche del materiale terra e i principi della tecnica costruttiva in terra battuta che permettono di stabilire un quadro conoscitivo di fondamentale importanza per poter operare le scelte necessarie in ambito di intervento di recupero e nella scelta di tecniche e materiali appropriati.

2 Il tema della conservazione e recupero del patrimonio in terra battuta:

L'analisi delle caratteristiche tecnologiche e tipologiche dell'architettura in terra battuta in Piemonte hanno permesso di evidenziare aspetti di interesse per il recupero della tecnica costruttiva sul territorio locale

E' parso importante affrontare anche lo studio delle principali **strategie per il recupero della filiera della costruzione in terra cruda** attuate in Italia e in Francia negli ultimi decenni, che ha consentito di individuare le criticità da superare nell'ottica di un recupero del *patrimonio intangibile*, costituito dai saperi artigiani relativi alla tecnica costruttiva e della ricostituzione di un mercato edilizio legato alle tecnologie in terra cruda.

La messa a punto di linee guida per il recupero, in particolare, delle murature in terra battuta con tecnologie appropriate, riportate in schede di sintesi, è stato l'esito della partecipazione attiva a un cantiere sperimentale di recupero di un edificio in terra battuta in Francia.

3 Comportamento e prestazioni termiche di edifici e dell'elemento murario in terra battuta.

Il tema è stato sviluppato su più fronti:

- è stato effettuato il monitoraggio di un edificio in terra battuta in Piemonte attraverso il quale è stato possibile stabilire le **prestazioni in termini di trasmittanza termica** in regime stazionario delle pareti in terra battuta e verificare **l'andamento delle temperature dell'aria negli ambienti interni** all'edificio durante il periodo estivo.

- attraverso la partecipazione al progetto di ricerca *Le patrimoine bâti face aux normes thermiques, Communauté des Communes Chalaronne - Centre*, sul tema del **consumo energetico del patrimonio** di "architettura minore" in terra battuta nella Dombes, Rhône-Alpes, sono stati definiti i consumi energetici del patrimonio identificato ed individuati **fattori di matrice sociale e tecnologica che concorrono ad influenzare le prestazioni energetiche** del patrimonio in terra battuta locale;

- la **Sperimentazione in laboratorio di componenti isolanti a base di terra e fibre vegetali locali** ha permesso, infine, di stabilire, attraverso successivi test termici con il metodo della piastra calda, le prestazioni termiche

in regime dinamico di componenti murari in terra battuta realizzati in laboratorio e di misurare gli incrementi prestazionali con l'abbinamento di i pannelli in terra alleggerita, fino a definire gli spessori necessari per raggiungere le prestazioni termiche in regime stazionario indicate dalla normativa vigente sull'adeguamento termico di edifici in caso di retrofit.

Conservazione e recupero del patrimonio in terra battuta

Nella fase di studio, particolarmente rilevante si è dimostrato l'approfondimento delle strategie di recupero della filiera costruttiva in terra cruda attuate negli ultimi decenni in alcune regioni italiane e francesi. Per la salvaguardia e la sopravvivenza del patrimonio costruito, la conservazione dei saperi artigiani relativi alle tecniche e pratiche costruttive, cioè di quello che viene considerato il *patrimonio intangibile*, risulta indispensabile. In alcune regioni della Francia, l'attuazione di politiche basate sulla formazione di nuovi artigiani e imprese, sulla sensibilizzazione di amministrazioni e cittadini, ha portato alla parziale ricostituzione di un mercato della costruzione in terra cruda. Alcuni di questi esempi vengono analizzati e messi a confronto con le politiche attuate nelle regioni italiane in cui la costruzione in terra battuta è tradizionalmente diffusa, considerando le attività di formazione, sensibilizzazione e diffusione intraprese sui territori locali e l'impatto che hanno avuto sulla costituzione di imprese e dello sviluppo di un mercato locale dell'edilizia in crudo. Il materiale è stato raccolto tramite la partecipazione a corsi di formazione professionale presso CRAterre e interviste dirette ad alcuni degli attori che hanno contribuito allo sviluppo dei processi locali oggetto della ricerca; dove non è stato possibile, si è fatto ricorso a materiale reperibile in letteratura.

L'aspetto tecnologico relativo all'approccio a interventi di recupero su strutture murarie in terra battuta è stato sviluppato attraverso la partecipazione attiva e costante al cantiere di recupero sperimentale su un edificio abitativo in terra battuta a Ponte de Veyle, Rhône-Alpes, che ha permesso di confrontare le tecnologie studiate in letteratura, e in occasione di corsi di formazione presso CRAterre². Sulla base della lettura scientifica e delle esperienze citate, è stato costruito un quadro dei fenomeni di dissesto e degrado ricorrenti nelle costruzioni in terra battuta, con particolare attenzione alle patologie dovute all'azione dell'acqua.

L'esperienza del cantiere francese, a carattere prettamente sperimentale teso al massimo impiego delle risorse naturali disponibili in loco, è stata sfruttata per realizzare esperimenti sulla composizione di diverse miscele di terra, in alcuni casi con aggiunta di fibre vegetali. Le miscele, come altri componenti a base di terra realizzati in cantiere, sono state poi utilizzate per interventi di riparazione sulle murature in terra battuta dell'edificio e per soluzioni di rivestimento di pareti interne.

Gli interventi realizzati durante il cantiere sono stati riportati in una serie di schede tematiche, organizzate per tipologie di intervento. Nelle schede sono stati approfonditi i temi legati alla preparazione delle miscele di terra necessarie agli interventi e al procedimento seguito per la posa in opera; sono state, inoltre, indicate le cause del degrado rilevato e una serie di operazioni preliminari da eseguire per accertare le cause del danno e di preparazione agli interventi. Le schede costituiscono una piccola guida, seppur non esaustiva del tema del recupero, per la realizzazione degli interventi effettuati durante il cantiere, rivolta ad artigiani, maestranze e professionisti.

2 CRAterre "è un'Associazione ed un Laboratorio di ricerca de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble"; <http://craterre.org/>

Il cantiere ha rappresentato, infine, l'occasione per una prima sperimentazione su componenti a base di terra alleggerita con fibre, finalizzata alla messa a punto di tecnologie per l'isolamento di pareti in terra battuta, che ha costituito la base di partenza per la fase di sperimentazione della ricerca.

Comportamento e prestazioni termiche di edifici e dell'elemento murario in terra battuta.

Lo studio del comportamento termico di strutture in terra battuta è stato affrontato secondo due modalità: il monitoraggio di un edificio in Piemonte, che ha permesso di misurare le prestazioni in opera delle pareti, e la partecipazione a un progetto di indagine sui consumi energetici del patrimonio di "architettura minore" nella zona della *Dombes* (Rhône-Alpes), in Francia. I risultati ottenuti hanno contribuito a definire il campo di indagine per la fase sperimentale che ha portato alla realizzazione in laboratorio di pannelli in terra alleggerita con fibre vegetali per l'isolamento termico di murature in terra battuta.

Al fine di analizzare gli aspetti legati al comportamento termico di costruzioni in terra battuta in opera è stato realizzato un monitoraggio in collaborazione con il laboratorio LAMSA del Politecnico di Torino, su un'abitazione in terra battuta situata nei pressi di Novi Ligure (AL). L'abitazione, un *cascinotto* di due piani fuori terra in muratura portante di terra battuta, è stata ristrutturata di recente dall'arch. G. Bollini (Bollini 2013); gli interventi realizzati sull'edificio volti al miglioramento del comfort termico sono riportati.

Il monitoraggio durante il periodo estivo ha permesso di raccogliere dati sull'andamento delle temperature degli ambienti interni all'edificio, ed è stato effettuato con il sistema ST 1100; i dati sono stati misurati per mezzo di *Data Logger* per il rilevamento della temperatura ambiente. L'andamento delle temperature interne, confrontato con quello delle temperature all'esterno conferma la capacità delle murature in terra battuta di attenuare in modo considerevole i picchi delle oscillazioni di temperatura dell'aria ambiente interna rispetto a quelle delle temperature dell'aria ambiente esterna.

Un secondo monitoraggio è stato eseguito durante il periodo invernale, secondo la norma EN 12494, utilizzando termoflussimetri per la misurazione del flusso di calore passante attraverso la parete. La trasmittanza termica di una delle pareti perimetrali in regime stazionario, calcolata a partire dai dati sperimentali con il metodo della media mobile, risulta in linea con i dati reperibili in letteratura. I dati raccolti confermano la scarsa attitudine delle murature in terra battuta a moderare le basse temperature esterne invernali a causa di una bassa resistenza al trasferimento di calore attraverso la propria massa.

Il progetto di ricerca *Le patrimoine bâti face aux normes thermiques* sul tema del consumo energetico del patrimonio di "architettura minore" in terra battuta nella *Dombes*, nella Regione Rhône-Alpes, realizzato in collaborazione fra la *Communauté des Communes Chalaronne - Centre* e l'associazione locale St Guignefort, è stato il centro del lavoro di due studenti DSA presso CRATerre, Alejandro Buzo e Hyeon Jeong Cho³.

Grazie alla collaborazione della comunità di comuni è stato individuato un campione di abitazioni su cui sviluppare

³ Il lavoro è stato seguito offrendo supporto scientifico, insieme all'architetto Gregoire Paccoud e alla sociologa Léa Genis, durante un soggiorno di studio presso il Laboratoire CRATerre - ENSAG di Grenoble

l'indagine. Attraverso un questionario somministrato ai proprietari delle abitazioni oggetto d'indagine, è stato costruito per ogni edificio un quadro comprensivo di aspetti legati:

- ai consumi energetici dovuti alla climatizzazione degli edifici;
- alle soluzioni tecnologiche riferite agli interventi di recupero, in particolar modo quelli tesi al miglioramento del comfort termico, realizzati sugli edifici;
- alle trasformazioni subite dallo spazio abitativo;
- a risvolti socio-comportamentali, centrati sui modi di vita degli abitanti e sulle trasformazioni dello spazio abitativo

I dati ottenuti sono stati raccolti in schede sintetiche per ciascun edificio visitato. L'incrocio dei dati attraverso un'ulteriore analisi ha permesso valutazioni interessanti sugli aspetti che influenzano la prestazione energetica del campione di indagine. Pur non arrivando a produrre risposte certe in materia di strategie di intervento nell'ottica di un'ottimizzazione dei consumi energetici per abitazioni in pisé, il progetto introduce nuovi parametri di ricerca, coinvolgendo nell'indagine aspetti che riguardano anche la cultura dell'abitare, anziché concentrarsi unicamente sulla prestazione termica dell'involucro in terra battuta. Considerazioni interessanti sono state sviluppate relativamente all'incidenza dei forti mutamenti della società avvenuti nel secolo passato: la riduzione dei componenti il nucleo familiare, le nuove concezioni dell'abitare legate alla dismissione del sistema agricolo e le conseguenti trasformazioni subite dallo spazio abitativo che risultano aver modificato in maniera sostanziale il funzionamento termico delle abitazioni.

Le indagini realizzate sui sistemi tecnologici di isolamento, durante l'inchiesta sul patrimonio di "architettura minore" in pisé in Francia, restituiscono un quadro poco interessante ai fini della ricerca: pochi sono i casi di isolamento vero e proprio delle pareti in terra e risulta difficile valutare il peso dei singoli interventi sulla prestazione energetica dell'edificio.

Il tema dell'isolamento di pareti in terra battuta è, del resto, piuttosto spinoso; i dubbi principali sono dovuti alla necessità di assicurare alla parete la possibilità di mantenere intatte le proprie capacità igroscopiche, con i relativi apporti alla prestazione termica della parete, alla riduzione delle capacità di accumulo del muro ed alla possibilità di surriscaldamento degli ambienti interni durante il periodo estivo. Ulteriori freni si devono ad eventuali esigenze paesaggistiche. Studi compiuti in Australia mettendo a confronto prestazioni termiche di edifici in terra cruda con pareti esterne isolate e non isolate, riportano prestazioni estive molto simili, che tendono ad escludere il rischio di surriscaldamento interno e miglioramenti sensibili sulla prestazione invernale (Soebarto 2009). Altri studi, effettuati in Inghilterra, sulle prestazioni termiche del componente murario in terra battuta, mostrano come la coibentazione, anche dall'interno possa ritenersi una valida soluzione (Hall, Allinson 2008); gli studi sono stati effettuati però solo con isolanti di origine industriale e poco permeabili al vapore. A fronte del quadro risultante è stata realizzata una scheda sintetica di classificazione dei sistemi tecnologici per l'isolamento di parete in terra battuta con materiali naturali. Nella scheda sono riportate la stratigrafia dei sistemi tecnologici, i materiali per l'isolamento compatibili con ciascuna tecnica ed è affrontato il tema della posa in opera. Il lavoro di analisi è proseguito analizzando benefici e limiti di sistemi di isolamento interno ed esterno, da un punto di vista termico e di posa in opera.

Il lavoro di ricerca è proseguito esplorando il tema dell'isolamento termico di murature in terra battuta con elementi in terra alleggerita con fibre vegetali secondo un approccio sperimentale che ha portato alla realizzazione, presso il laboratorio STI del Politecnico di Torino, di pannelli campione in terra alleggerita con diversi tipi di fibre vegetali reperibili sul territorio Piemontese da scarti di lavorazione.

A seguito dell'analisi sul comportamento termico della terra battuta è stato ipotizzato che l'uso di componenti a base di terra e fibre per l'isolamento di queste strutture potrebbe ridurre la trasmissione di calore dall'esterno mantenendo inalterate le proprietà igroscopiche e contestualmente incidere solo in parte sulle ottime prestazioni della parete in termini di inerzia termica. Inoltre, grazie a valori di conducibilità termica non troppo distanti da quelli delle pareti in terra battuta (Volhard 1995), il rischio di condensa nell'interstizio tra i due materiali sarebbe estremamente ridotto, anche in caso di posizionamento dell'isolante sulla faccia interna della parete.

A seguito di specifica indagine, sono state individuate tre fibre vegetali di particolare interesse ai fini della ricerca, disponibili sul territorio regionale:

- Paglia di riso, per la particolare diffusione della coltura sul territorio regionale
- Fibra di canapa, in quanto considerata, di fatto, uno scarto di produzione in Italia e per la presenza di un impianto di prima trasformazione a **Carmagnola**, gestito da **Assocanapa**.
- Poligono del Giappone⁴ considerata una pianta invasiva inclusa in diverse liste nere europee e nazionali, di difficile eradicazione, largamente diffusa in Piemonte.

Sono stati prodotti in laboratorio muri campione in terra battuta, con un materiale di base proveniente dalla zona di Novi Ligure (AL), e pannelli in terra alleggerita con le fibre selezionate, allo scopo di effettuare **prove termiche con il metodo della piastra calda**⁵.

Sono stati realizzati **tre muri campione in terra battuta** con diverso **tenore d'acqua** in fase di compattazione, per verificare l'eventuale incidenza di questo parametro sulle prestazioni termiche, considerando la possibilità che il diverso volume di pori che si forma nelle strutture murarie con l'essiccazione possa giocare un ruolo sulla conducibilità termica del campione. Sono stati costruiti in laboratorio casseri adatti alla compattazione di pareti in terra battuta a partire da casseforme tradizionali e di nuova produzione. La terra utilizzata per la sperimentazione è stata caratterizzata attraverso un'**analisi granulometrica** per setacciatura e per sedimentazione, prove da campo e test sui **limiti di Atterberg** hanno permesso di determinarne composizione, grado di espansività e grado di coesione, in modo

⁴ Il Poligono del Giappone è una pianta infestante di origine asiatica ormai estremamente diffusa in Piemonte ed attualmente iscritta nella lista delle 100 specie esotiche più invasive e dannose del mondo per l'equilibrio naturale autoctono, e segnalata in molte liste nere regionali in Italia. (Gruppo di Lavoro Specie Esotiche della Regione Piemonte 2013); Lombardia, Allegato E alla D.G. R. 7736 - 2008.

⁵ Il metodo fa riferimento alle norme UNI EN 12667, UNI EN 12664, ASTM C518 e sono stati svolti con un apparato sperimentale secondo il metodo termoflussimetrico con anello di guardia, capace di misurare conducibilità termica e resistenza termica dei materiali, lo strumento è stato settato per effettuare prove in regime statico e in regime dinamico. Un'ampia descrizione delle prove viene fornita nel capitolo 7.5.

da valutarne le possibilità d'uso in edilizia. Prove **Proctor standard**⁶ hanno permesso di determinare il **contenuto ottimale di umidità** per la miscela di terra utilizzata in fase di compattazione affinché le pareti possano raggiungere la massima densità a secco possibile.

Per ciascuna fibra è stato progettato di realizzare una coppia di **pannelli in terra alleggerita** con diversi dosaggi, in terra e fibre, stabiliti a partite da prove effettuate presso il *Laboratoire CRAterre - ENSAG* di Grenoble, utilizzando come componente fibrosa la fibra di Poligono del Giappone.

I componenti realizzati in laboratorio sono poi stati sottoposti a **prove termiche in piastra calda** presso il laboratorio del DENERG, al Politecnico di Torino.

Le prove sono state realizzate in regime stazionario e dinamico sui singoli componenti e su pareti composte accostando un campione in terra battuta ai diversi pannelli. I test permettono valutazioni in particolare sulle prestazioni termiche dei componenti in termini di **sfasamento termico, trasmittanza termica periodica, fattore di attenuazione, ammettenza termica e capacità termica areica interna**. Attraverso questi parametri è possibile valutare come variano le prestazioni termiche in regime dinamico delle parete composite, a seconda delle diverse configurazioni e del dosaggio di terra e fibre contenuto nei pannelli, e l'impatto dei pannelli stessi sulla prestazione termica della sola parete in terra battuta.

I risultati ottenuti attraverso le prove sperimentali sono stati utilizzati indirettamente per calcolare le prestazioni termiche in regime dinamico e stazionario delle diverse configurazioni di parete su scale di spessore reale con il metodo indicato dalla norma UNI EN ISO 13786⁷; lo spessore del pannello isolante è stato calcolato in modo che i pacchetti murari fossero in grado di raggiungere le prestazioni termiche in regime stazionario indicate dalla normativa vigente in Italia. Sono state valutate soluzioni posizionando i pannelli sia sul lato interno che sul lato esterno della parete. I risultati offrono interessanti spunti di riflessione sulle prestazioni termiche delle pareti composite testate, in rapporto a quelle della sola parete in terra battuta. I valori ottenuti sulle prestazioni in regime dinamico di **trasmittanza termica periodica, sfasamento termico e fattore di attenuazione** non sembrano risentire particolarmente della posizione dei pannelli, mentre altri fattori come la **capacità termica areica interna**, consentono spunti di riflessione sulle prestazioni di inerzia termica e di accumulo della parete.

⁶ Le prove sono state realizzate secondo le norme UNI EN 13286-2:2005, CNR BU 69/73, AASHTO T265.

⁷ La norma UNI EN ISO 13786 stabilisce metodi di calcolo per definire le caratteristiche e le prestazioni termiche in regime dinamico dei componenti edilizi.

SEZIONE 1
COSTRUIRE IN TERRA BATTUTA

1. TERRA CRUDA COME MATERIALE DA COSTRUZIONE

Sezione 1

La terra è un materiale trifasico: al suo interno, oltre a quella solida, agiscono altre due componenti, liquida e gassosa. Tutte e tre le fasi ne determinano le caratteristiche fisico-meccaniche e sono ugualmente necessarie al mantenimento della coesione del terreno (Guillaud et al. 2008). La componente solida è composta da ghiaia, sabbia, limo e argilla, le cui percentuali possono variare in modo significativo e definiscono la granulometria di un terreno. Ghiaia e sabbia sono la componente inerte di un terreno e ne costituiscono lo scheletro granulare; per entrambe possiamo distinguere granulometria grossa, media e fine, secondo le dimensioni delle particelle che le costituiscono.

La ghiaia, particelle solide del diametro di 60-2000 mm, costituisce lo scheletro del terreno e incide sulla capacità della terra di limitare i fenomeni di ritiro e capillarità.

La sabbia, particelle solide di diametro di 0,075-2,0 mm, è in genere composta di quarzo e silicio e conferisce permeabilità al terreno (Bollini 2013).

Il limo è costituito da minerali stabili e permeabile all'acqua e influenza il grado di coesione della terra. Il diametro delle sue particelle va da 0,075 a 0,075 mm.

Le argille, idrati allumino-silicosi, sono particelle microscopiche e submicroscopiche di forma lamellare, di spessore inferiore a 0,002 mm e sono responsabili dell'azione legante sul terreno.

TERRE A GRANA GROSSA							TERRE A GRANA FINE	
CIOTTOLI (mm)	GHIAIA (mm)			SABBIA (mm)			LIMO (mm)	ARGILLA (mm)
	grossa	media	fine	grossa	media	fine		
> 60	60 - 20	20 - 6	6 - 2	2,0 - 0,6	0,6 - 0,2	0,2 - 0,06	0,06 - 0,002	< 0,002

Tabella 1.1, Schema della distribuzione granulometrica degli elementi che compongono i suoli

La struttura granulare del terreno lascia spazio a dei vuoti che, in diverse proporzioni e a seconda del grado di umidità del suolo, possono essere occupati da una componente gassosa, principalmente aria, oppure da una componente liquida, l'acqua. La distribuzione di queste componenti determina la struttura del terreno e, di conseguenza, le sue proprietà fisico-meccaniche.

Distribuzione dei grani

Il materiale terra è dunque costituito da grani che interagiscono da un punto di vista meccanico e chimico; di questi grani una parte viene definita inerte,

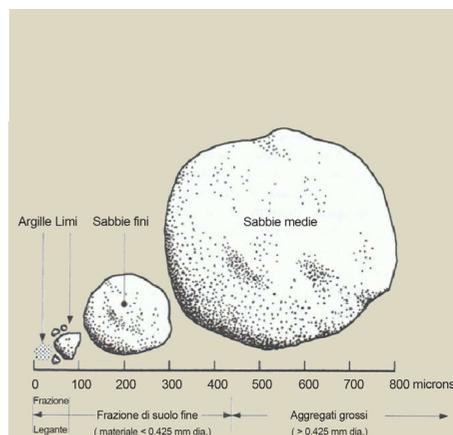


Fig. 1.1, schema della dimensione dei grani presenti nei suoli.

mentre l'altra è definita attiva.

I grani inerti, dai 10 micron in su (Bollini 2013), sono formati da frammenti di roccia di forma più o meno sferica a seconda dell'età e dell'azione esercitata nel tempo su di essi dagli agenti atmosferici; la loro azione è definita solo dalle forze di massa. Gli inerti costituiscono lo scheletro e la componente strutturale del terreno, le proporzioni in cui vi si trovano contribuiscono a determinarne le caratteristiche: la sabbia, ad esempio, è in grado di regolare i fenomeni di ritiro e di fessurazione in seguito all'essiccazione del prodotto edilizio realizzato. Le dimensioni dei grani presenti nella miscela di terreno devono essere coerenti con lo spessore dei prodotti edilizi da realizzare. Grani troppo grossi possono compromettere un'omogenea distribuzione della miscela di terra in componenti edilizi di spessore sottile.

I grani attivi hanno dimensioni di pochi micron, si presentano per lo più sotto forma di lamelle sottilissime e agiscono in relazione con i gas e i liquidi interstiziali presenti nel terreno sia per mezzo delle forze di massa che attraverso un'attività superficiale delle particelle di cui sono composti. Si tratta principalmente di argille, la componente legante del terreno. Le particelle lamellari sono disposte come in una serie di pacchetti di fogli paralleli; l'acqua che si interpone tra i fogli riempiendo gli spazi interstiziali, ne permette lo scivolamento e la conseguente deformazione del composto. Regolando la quantità di liquido presente nei vuoti tra le lamelle, la miscela di terra può passare dallo stato plastico a quello liquido o a quello solido. I processi che determinano questi passaggi di stato sono esclusivamente fisici, e quindi interamente reversibili.

L'aggregazione, la dimensione e la disposizione spaziale delle particelle che compongono il terreno ne determinano la struttura.

Terreni granulari: terreni a forte componente strutturale, in particolare ghiaia, su cui l'azione legante dell'argilla è ridotta al minimo; sono chiaramente inadatti alla costruzione poiché mancano di sufficiente coesione.

Terreni a struttura frammentata: presentano diversi vuoti; la componente strutturale di sabbia e ghiaia è tenuta insieme a piccoli grappoli dall'azione legante dell'argilla.

Terreni a struttura continua: suoli dall'aspetto compatto in cui la componente inerte è omogeneamente distribuita e tenuta insieme da una miscela uniforme di argilla e limo.

Le percentuali in cui sono distribuite le diverse componenti all'interno della

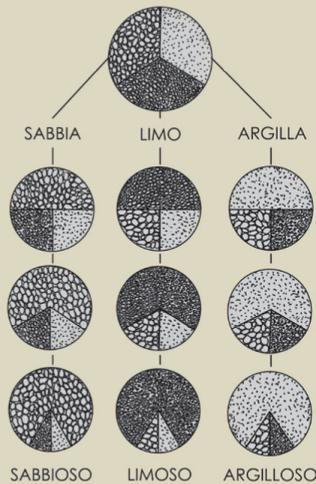


Fig. 1.2, Schema della struttura dei suoli in base alla loro composizione, secondo Houben, Guillaud 1989. (da Bollini 2013)

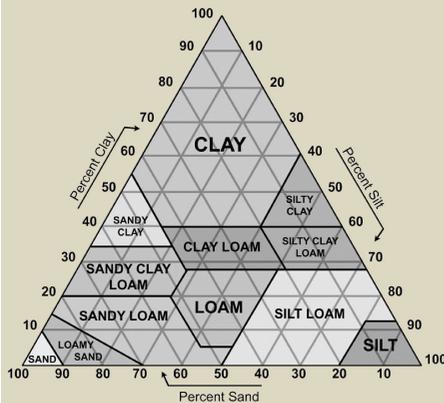


Fig. 1.3, Schema della struttura dei suoli in base alla loro composizione. Le frecce indicano il verso di lettura dei dati espressi in percentuale delle diverse componenti del suolo.

miscela che forma un terreno ne determinano invece la tessitura e quindi le caratteristiche fisico-meccaniche, fornendo indicazioni sui possibili impieghi nella costruzione. Terreni con forti componenti sabbiose o limose possono avere una bassa capacità di coesione ma maggiore capacità di gestione di fenomeni da ritiro e fessurazione in seguito all'essiccazione; terreni ad elevata componente argillosa possono avere una forte coesività ed essere particolarmente plastici, ma, anche a seconda del tipo di argille presenti, possono essere altamente sensibili al ritiro e quindi soggetti a forti fessurazioni.

La distribuzione dei grani di un terreno e le percentuali delle diverse particelle sono fondamentali per determinare quali tecniche costruttive è possibile realizzare. Allo scopo di verificare la compatibilità di un terreno con le diverse tecniche costruttive, si possono eseguire una serie di prove tese a definirne le caratteristiche; prove di tipo geotecnico sono realizzabili in laboratorio per risultati di maggiore precisione, ma esistono procedure di prova realizzabili facilmente anche in cantiere che risultano molto utili, soprattutto in condizioni di autocostruzione e, in genere, quando non è possibile accedere ad un laboratorio scientifico.

Le Argille, gli agenti leganti

All'interno del terreno possono trovarsi diversi tipi di argille le cui proprietà di espansione influenzano le caratteristiche di ritiro e le capacità leganti del terreno. Le argille maggiormente usate in costruzione hanno generalmente una plasticità piuttosto elevata, che varia a seconda dei costituenti: argille magre, con una maggiore quantità di sostanze arenacee, presentano caratteristiche di plasticità inferiori, mentre le più grasse, con un maggiore contenuto di componenti argillose, presentano plasticità più elevata.

Tra le argille più comuni presenti nei suoli, vi sono Illite, Caolinite e Montmorillonite. Hanno comportamenti diversi a contatto con l'acqua: la Caolinite è la più stabile delle tre; l'Illite è il componente più diffuso ed è piuttosto soggetta a rigonfiamento; la Montmorillonite è la più espansiva delle tre.

A scala nano-metrica l'argilla è costituita da cristalli silicati in forma di sottili lamelle di dimensioni inferiori a 0,002 mm, che a seconda del minerale si sovrappongono in due o tre strati tetraedrici o ottaedrici per formare fogli di cristalli le cui proprietà possono variare considerevolmente a seconda della struttura (Röhlen, Ziegert 2011, p. 9). Le forze di coesione delle argille sono dovute a ioni a carica negativa e positiva che agiscono sulla superficie delle

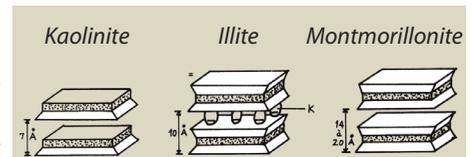


Fig. 1.4, Schema principali tipi di argilla secondo Houben, Guillaud 1989 (da Minke 2006).

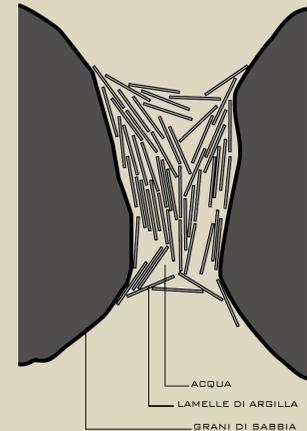


Fig. 1.5, Schema dei ponti liquidi che si formano tra le lamelle di argilla (rielaborazione da LeTiec, Paccoud, 2006)

lamelle; le lamelle hanno un rapporto superficie/massa, denominato superficie specifica, molto elevato, che consente loro di costituire dei legami di coesione molto forti derivanti dall'attrazione fisica delle particelle.

L'acqua che entra in contatto con le lamelle di argilla tende a riempire i vuoti tra di esse; trattenuta e resa altamente viscosa dal campo generato dagli ioni sulle superfici delle particelle lamellari, impedisce lo scorrimento delle lamelle generando delle forze leganti. In questo senso si può affermare che il vero agente legante dei suoli è l'acqua. Con l'applicazione di una forza esterna, le lamelle tendono a compattarsi e, entrando in contatto reciproco, formano dei fogli intervallati dallo strato d'acqua; si creano così delle forze leganti che rimangono attive anche al cessare dell'azione della forza esterna. In questo modo l'argilla acquista una forza di coesione allo stato plastico (Minke 2006). Questo contenuto d'acqua è indipendente dall'ambiente climatico esterno e può essere rilasciato solo a temperature molto elevate. Come tutti i materiali porosi, le argille sono in grado di assorbire acqua dall'ambiente esterno, attraverso un processo di assorbimento di vapore. A differenza dell'acqua legata ai cristalli lamellari di argilla, l'acqua assorbita dall'esterno tende a indebolire i legami di coesione tra i minerali argillosi con l'aumentare delle molecole che si addensano intorno alle strutture argillose (Röhlen, Ziegert 2011, p. 9). Con l'evaporazione dell'acqua le lamelle si avvicinano e l'acqua interposta aumenta di viscosità rafforzando i legami tra di esse; con l'essiccazione dell'acqua, l'argilla ottiene una certa resistenza a compressione e a trazione (Minke 2006). La quantità d'acqua che le argille sono in grado di assorbire prima che gli spazi tra le lamelle arrivino a saturazione dipende dalle caratteristiche dei diversi tipi di argille.

Il tenore d'acqua

La componente liquida del materiale terra, principalmente costituita da acqua, agisce sui legami tra le particelle solide determinando lo stato del composto.

La quantità d'acqua ottimale affinché la terra possa essere manipolata e lavorata in componenti edilizi, dipende da diversi fattori: la composizione del terreno e la distribuzione dei grani, la percentuale e la tipologia di componente argillosa presente, la tecnologia costruttiva che si vuole utilizzare.

Il tipo di argilla presente nel terreno determina il quantitativo d'acqua che le lamelle di cui la stessa argilla è composta riescono ad assorbire. Dalla componente liquida dipendono alcuni fenomeni :

Coesione del terreno: come si è visto, limi e argille acquistano forza di coesione grazie all'interazione con l'acqua

Rigonfiamento: le argille assorbendo acqua si gonfiano, aumentando il volume del terreno, la dimensione del rigonfiamento dipende dal tipo di argilla, ma anche dalla distribuzione dei grani. Secondo studi effettuati da G. Minke (Minke 2006, p. 24) l'ottimizzazione delle percentuali di limo e sabbia nella miscela di terra aiuta a controllare questi fenomeni.

Ritiro: una volta che l'acqua assorbita evapora per essiccazione, il terreno tende a perdere volume e a contrarsi; la componente sabbiosa e limosa al suo interno aiuta a contenere questo effetto, evitando la formazione di fessure.

Plasticità: la plasticità è la capacità di un terreno di subire deformazioni senza frantumarsi sottoposto alla pressione di una forza esterna. L'indice di plasticità definisce l'incremento d'acqua, rispetto al peso secco del terreno, necessario

affinché il suolo passi dallo stato plastico a quello liquido (Walker, Maniatidis 2003, p. 11). Dipende dalla forma e dimensione dei grani (Bollini 2013, pp. 30).

Il contenuto d'acqua ottimale per una terra da costruzione dipende, come detto, oltre che dalle caratteristiche fisiche del suolo, anche dalla tecnologia costruttiva che si intende utilizzare. Un suolo ad un tenore d'acqua dello 0-5% è definito asciutto e non è adatto alla lavorazione, poiché non è possibile dargli forma. Generalmente la terra può essere utilizzata per la costruzione allo stato umido oppure allo stato plastico, mentre miscele di terra allo stato viscoso (15-35% d'acqua) e allo stato liquido sono utilizzate più facilmente come leganti. Terreni allo stato umido vengono lavorati con un tenore d'acqua del 5-20% circa, per tecnologie che prevedono un sistema di compattazione, ad esempio la *terra battuta* in casseri, oppure per la produzione di mattoni o blocchi di terra compressi (*BTC*¹, la compressione avviene in questo caso attraverso un apposito macchinario per via meccanica). Per questo tipo di tecnologie sono particolarmente adatti terreni magri, con una componente argillosa contenuta e una maggiore percentuale di sabbia e limo. Miscele allo stato plastico sono invece maggiormente indicate per tecnologie che vengono definite "bagnate" e che prevedono la modellazione della terra; in questo caso il tenore d'acqua varia dal 15 al 30% circa e i terreni più adatti sono di tipo grasso, cioè con una maggiore quantità di argilla ed una buona plasticità. Alcune di queste tecniche sono ad esempio *l'adobe* (mattoni di terra essiccati al sole) o la tecnica del *massone* (*Cob* in Inghilterra, *Bauge* in Francia).

1 Blocchi di Terra Compattata

2. TERRA BATTUTA: LA TECNICA COSTRUTTIVA

Sezione 1

2.1 LA TECNICA COSTRUTTIVA

La terra battuta è una tecnica costruttiva in terra cruda utilizzata per realizzare strutture portanti massicce e monolitiche, con comportamento scatolare, in cui, cioè, le strutture parietali funzionano se interconnesse tra loro in tutti i giunti angolari; anche i muri interni hanno funzione strutturale e sono ammortati durante la realizzazione alle pareti perimetrali. Una struttura di questo tipo resiste a compressione, ma non possiede invece una buona resistenza a trazione, per cui il carico spingente, generato dalle strutture di copertura e da qualsiasi altro elemento gravante sulle pareti, dovrebbe essere ripartito il più possibile su superfici ampie attraverso cordoli o travi di distribuzione del carico o altri elementi che assolvano alla funzione. Come per le strutture portanti in pietra o laterizio è opportuno posizionare vuoti su vuoti e pieni su pieni ed esistono rapporti dimensionali tra pieni e vuoti sia in termini di superficie che di distanze minime da rispettare per una buona tenuta dell'intero sistema strutturale.

Nelle nuove costruzioni, oggi, la terra battuta viene anche facilmente associata a grosse superfici vetrate per l'accumulo termico, e, più in generale, usata in architetture concepite per sfruttare l'energia del sole attraverso sistemi passivi sfruttando la massa delle pareti (Röhlen, Ziegert 2011, p. 152).

La terra viene lavorata allo stato umido e compattata per strati all'interno di casseri, utilizzando pestelli manuali oppure compattatori pneumatici. Se una volta la compattazione avveniva attraverso processi completamente manuali, oggi, a seconda del contesto, vengono utilizzati anche sistemi fortemente meccanizzati.

In origine, l'architettura in terra battuta si è diffusa nelle regioni in cui il suolo aveva la composizione e le caratteristiche adatte all'uso di questa tecnica; il materiale da costruzione veniva generalmente utilizzato allo stato naturale. Oggi, invece, la tendenza alla prefabbricazione degli elementi costruttivi fa sì che si preferisca miscelare il terreno con diversi aggregati in modo da renderlo il più adatto possibile allo scopo specifico.

Suoli adatti alla costruzione in terra battuta: granulometria

La terra battuta è una tecnica costruttiva che permette l'utilizzo di terreni caratterizzati da un ampio ventaglio di distribuzioni granulometriche differenti, nonostante ciò, CRAterre¹ ha individuato un fuso limite per le costruzioni in terra battuta (Houben, Guillaud 1989). Una delle particolarità delle granulometrie utili per la terra battuta è la possibilità di includere inerti a grana grossa che, facendo da scheletro, permettono di rafforzare la struttura della parete. In generale la granulometria dovrebbe mantenere una certa coerenza con lo spessore dell'elemento costruttivo da realizzare, la dimensione e la percentuale di elementi di ghiaia grossolana nella miscela di terra dipendono più spesso dalle tipologie di suolo che si trovano localmente. Nel sud-est della Francia e in Piemonte, per esempio, viene impiegata ghiaia anche particolarmente grossa, come è evidente anche nella tessitura delle pareti, mentre in Spagna

¹ CRAterre "è un'Associazione ed un Laboratorio di ricerca de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble"; <http://CRAterre.org/>

o in paesi dell'America Centrale e del Sud, come il Messico ad esempio, vengono utilizzate terre dalla granulometria più fine.

La componente argillosa però deve rimanere all'interno delle proporzioni accettabili per non rischiare fenomeni accentuati di ritiro ed in modo che il composto non risulti di difficile lavorazione (Bollini 2013, p. 33).

In ambito scientifico non c'è ancora concordanza sull'individuazione dei limiti della curva granulometrica di suoli adatti alla costruzione in terra battuta. Walker e Maniatidis (Walker - Maniatidis 2003) propongono uno schema che mette a confronto i limiti superiori ed inferiori di granulometria proposti da diversi autori; secondo i dati, il contenuto minimo in argilla e limo dovrebbe essere del 20%-25%, mentre il massimo intorno al 30%-35%. La percentuale minima di sabbia e ghiaia dovrebbe aggirarsi sul 50-55%, la massima tra il 70%-75%.

G. Bollini indica percentuali leggermente dissimili: argilla 10%, limo 30-50%, sabbia e ghiaia 40-60% (Bollini 2013); In Röhlen - Ziegert si trovano riferimenti a distribuzioni granulometriche ottimali secondo le normative tedesche DIN³ (Röhlen, Ziegert 2011, p.152)

Il grafico realizzato da CRAterre rimane comunque il riferimento principale per individuare i limiti granulometrici per miscele di terra consigliate per la costruzione in terra battuta.

Tenore d'acqua ottimale

Al fine di permettere la compattazione in casseri, il terreno deve essere preparato miscelandolo con una quantità d'acqua tale che il composto resti umido senza mai tendere allo stato plastico. Il tenore d'acqua ottimale a cui lavorare il terreno può dipendere dalla sua composizione e può dunque variare, seppur all'interno di un certo intervallo, a seconda dei terreni. In letteratura sono indicati valori percentuali per il contenuto d'acqua in fase di compattazione dall'8% al 14% (Keefe 2005), intorno al 10% (Guerrero Baca 2007), di circa il 12% (Bollini 2013). Per la verifica del tenore ottimale d'acqua della terra da sottoporre a compressione, oltre a prove² complesse e non facilmente realizzabili in corso d'opera, da eseguire in laboratorio, esistono metodi da adottare direttamente in cantiere che

² Prove di compattazione Proctor standard per il contenuto ottimale d'acqua da aggiungere alla miscela di terra durante la fase di compattazione, sono descritte nel capitolo 7, pp. 182-186



Fig. 2.1, Texture di un muro in terra battuta a Novi Ligure (AL), si nota forte presenza di uno scheletro di ciottoli.



Fig. 2.2, Muro in pisé nella Dombes, Rhône - Alpes; anche qui la forte componente di ghiaia è evidente nella texture.



Fig. 2.3, Muro in pisé realizzato a Oaxaca, Messico; la superficie della parete appare meno ricca di ghiaia, ma, essendo la costruzione molto più recente, l'effetto potrebbe dipendere dalla minore erosione dello strato superficiale della parete ad opera degli agenti atmosferici.

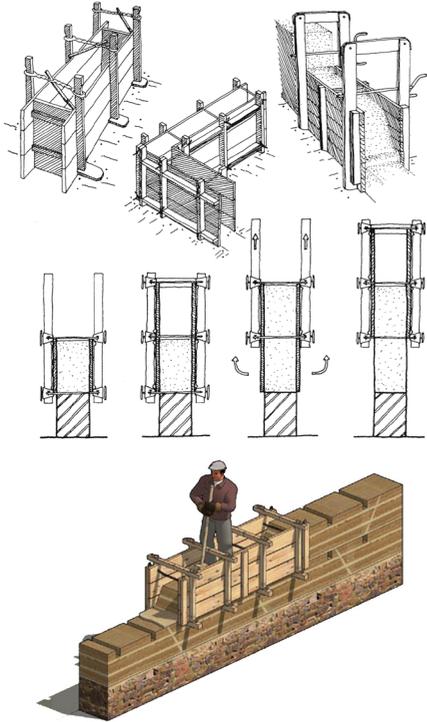


Fig. 2.5-2.6, Schemi di sistemi di cassetteria e compattazione tradizionale. (da Minke 2006; Rénover & Construire en Pisé dans le Parc naturel régional Livradois – Forez 2011)



Fig. 2.7-2.8, Sistema di cassetteria tradizionale, riprodotto all'Universitat Politecnica de Valencia per il workshop "Arquitectura de tierra: Técnica constructiva y restauración".

non necessitano di particolari strumenti³.

Le pareti in terra battuta asciugando all'aria aperta impiegano circa un anno per arrivare a contenuti di umidità intorno al 7%, per poi completare il processo di essiccazione più lentamente fino a raggiungere il contenuto ottimale d'acqua che si attesta sull'1,7% - 2% (Butler 2012).

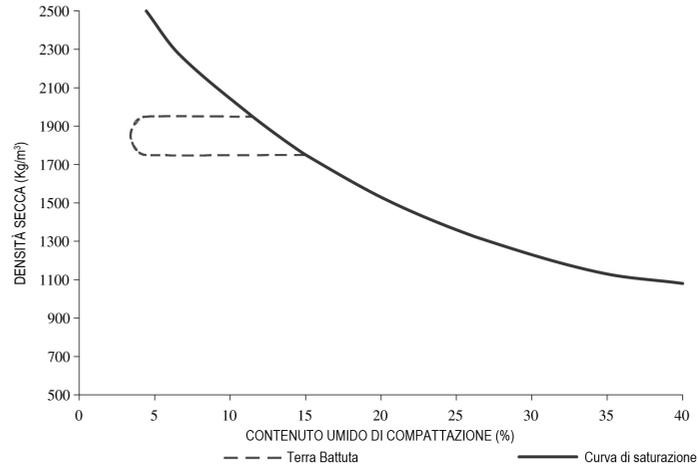


Fig. 2.4, Grafico del contenuto percentuale d'acqua in fase di compattazione in rapporto alla densità a secco, per la terra battuta. (rielaborazione da Jiménez Delgado, Cañas Guerrero)

Compattazione, densità e ritiro

Attraverso l'applicazione di una forza meccanica esterna con la battitura, la terra viene compressa all'interno dei casseri e le molecole d'acqua contenute negli strati lamellari di argilla fuoriescono; i grani si ridistribuiscono riducendo i vuoti all'interno della miscela di terreno, raggiungendo densità a secco dell'ordine di 1700 - 2400 Kg/m³.

Il sistema di compattazione ad umido permette di ridurre sensibilmente la misura del ritiro del prodotto realizzato e con essa il rischio di fessurazioni. La misura del ritiro non dovrebbe eccedere lo 0.2% - 0.4% secondo alcuni testi (Scudo, Narici, Talamo 2001), mentre Röhlen - Ziegert indicano valori massimi del 2% e di 0.5 - 0.7% del volume negli elementi costruttivi visibili; inoltre gli stessi descrivono un sistema di verifica del ritiro in apposito stampo (Röhlen, Ziegert 2011, p.153).

³ Per l'approfondimento della tematica relativa alle prove da campo si rimanda al capitolo 7.2.1, pp. 168-170

La terra viene compattata all'interno di casseri che in passato erano realizzati con assi di legno, rinforzati con montanti verticali e assicurati attraverso un sistema di tiranti e cunei (Bollini 2013). Questa tecnica lasciava i tipici fori, ben visibili nella muratura, dovuti ai traversini che servivano da base di appoggio per il cassero ed erano a loro volta adagiati sulla testa dell'ultima fila di terra compattata. Oggi esistono diversi sistemi di cassetteria che dipendono spesso dal tipo di elemento murario da realizzare, ma anche dal contesto del cantiere e che possono variare per dimensioni, materiali e sistema di elevazione. Per muri di una certa elevazione vengono spesso utilizzati anche casseri in metallo a progressione lineare o rampanti, derivanti dalle tecnologie di costruzione in calcestruzzo, che sono mobili e facilitano non poco gli aspetti di elevazione della cassaforma con il progredire della costruzione della parete in altezza; altrimenti esistono sistemi fissi che prevedono il montaggio e smontaggio del cassero con la progressione della compattazione, tanto lineare che in altezza, più simili al sistema tradizionale. Possono essere realizzati in legno, in metalli come acciaio, alluminio oppure con materiali plastici.

Strutture di cassetteria in metallo, anche di fattura artigianale, possono facilitare sensibilmente le operazioni di messa in bolla e la compattazione contemporanea di più blocchi sullo stesso tratto murario, favorendo la possibilità di agganciare fra loro più elementi modulari successivi (Pennacchio, Nicchia 2014). Oggi, anche sulla scorta dei risultati della ricerca legata all'edilizia in conglomerati cementizi, è possibile realizzare casseri per la compattazione di muri curvi o rastremati.

Le dimensioni dei casseri possono variare dai 50 ai 90 cm in altezza e da 100 a 250 cm circa in lunghezza; secondo Röhlen e Ziegert (Röhlen, Ziegert 2011 p. 156), i casseri devono poter sopportare un carico di superficie di 60 kN/m^2 e devono essere ben fissati nella zona inferiore di appoggio in modo che non tendano a rialzarsi. La compattazione avviene per strati di 10-15 cm, per mezzo di pestelli a mano o compattatori pneumatici che funzionano generalmente con compressori. I pestelli manuali originariamente erano realizzati in legno e successivamente anche in metallo, oppure veniva rinforzato con metallo esclusivamente il peso all'estremità inferiore. La base, non sempre piana, deve comunque essere di dimensioni limitate al fine di garantire uniformità di pressione al contatto con la terra da costipare. Generalmente la compattazione avveniva stando in piedi all'interno del cassero, oggi si fa maggiormente uso di sistemi che permettano all'operatore di agire su strutture indipendenti, riducendo vibrazioni indesiderate sulla parete in costruzione, o anche

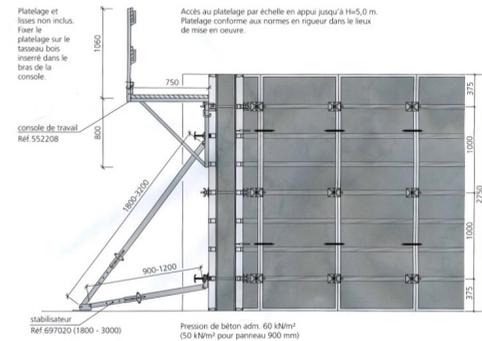


Fig. 2.9, Schema di un sistema di cassetteria contemporaneo utilizzato anche per la costruzione in calcestruzzo. (immagine da produttori)



Fig. 2.10-2.11, Sistema di cassetteria ibrido realizzato da un ONG di Oaxaca, Mexico, utilizzato dall'autore per la costruzione di un edificio in terra battuta (Pennacchio, Nicchia 2014). I casseri hanno struttura in ferro modulare e tamponamento in legno multistrato. La soluzione d'angolo prefabbricata (fig.2.10) permette particolare rapidità di montaggio e messa in bolla; i casseri sono giunti tra loro a pressione, per mezzo di un sistema di piastre in ferro, e bullonatura con barre filettate. (foto C. Mossetto)



Fig. 2.12, Dombes, Rhône – Alpes, sono visibili i filari di blocchi di cui è composto il muro in terra battuta, con giunti verticali inclinati in modo da favorire l'ammorsatura.



Fig. 2.13, Novi Ligure (AL), Piemonte, il muro in terra battuta è utilizzato come riempimento collaborante di una struttura di pilastri in mattoni cotti; il sistema è particolarmente diffuso in Piemonte.

stando su elementi montati sullo stesso cassero. In epoca contemporanea la compattazione avviene più facilmente attraverso l'uso di pistoni pneumatici a compressione che permettono di raggiungere livelli di densità maggiori rispetto ai sistemi manuali ed allo stesso tempo una maggiore uniformità di compattazione, poiché la forza applicata sulla superficie del muro è costante.

2.2 REALIZZAZIONE IN OPERA DELLE STRUTTURE MURARIE

La pareti in terra battuta sono realizzate generalmente su una zoccolatura di fondazione di almeno 30 cm fuori terra. Tradizionalmente le fondazioni erano in pietra o in laterizio, ma possono essere realizzate anche in calcestruzzo armato. Il basamento ha la funzione di proteggere il muro in terra dall'umidità capillare proveniente dal terreno e da eventuali schizzi di rimbalzo dalla superficie di calpestio adiacente alla costruzione, ma esistono esempi di murature in terra che proseguono sotto il piano di campagna, e costituiscono la fondazione. Nelle costruzioni attuali su zoccolature in parte permeabili all'umidità capillare proveniente dal terreno, viene inserito a volte uno strato di materiale a prova di umidità, sul quale si stende un'ulteriore materiale a prova d'acqua, come ad esempio un massetto di calcestruzzo (Röhlen, Ziegert 2011 p.162) o un corso di laterizi, in modo da proteggere la barriera all'umidità dai colpi di pestello e grani di terra durante la compattazione del muro.

Lo spessore delle pareti portanti dipende principalmente dall'elevazione fuori terra dell'edificio, e può variare da un minimo di 40-60 cm, per edifici a uno o due piani, fino a oltre 1 m, per costruzioni di diversi piani; alcuni autori riportano spessori anche più sottili per pareti portanti esterne, appena sopra i 30 cm (Röhlen, Ziegert 2011 p. 167). Diversi esempi di edifici particolarmente alti o mura di fortificazioni prevedono una progressiva rastremazione verso l'alto della parete, allo scopo di alleggerire il peso dei piani più alti.

Nonostante la terra battuta si consideri una tecnica di costruzione monolitica, le pareti non sono propriamente componenti edilizi unici, ma sono piuttosto costituite da grossi blocchi monolitici delle dimensioni dei casseri, realizzati per file orizzontali. Il cassero appoggia direttamente sul basamento e, una volta messo in bolla, viene riempito e compattato per strati di 10 cm con un pestello manuale o pneumatico. Nelle costruzioni moderne spesso vengono usati pestelli di forme e dimensioni diverse,

eseguendo una prima battitura con un pestello dal piatto di compattazione più ampio e una seconda con strumenti dal piede più piccolo. Inoltre esistono particolari strumenti per la battitura degli angoli del cassero, più difficilmente raggiungibili dai classici pistoni pneumatici a piatto tondo. Terminata la compattazione, il cassero viene disarmato e rimontato in modo da proseguire il primo corso di blocchi. Il corso superiore viene eseguito sfalsando i blocchi di almeno 1/4 della dimensione longitudinale, in modo da evitare l'allineamento dei giunti verticali. I giunti tra i diversi blocchi possono essere verticali come obliqui a seconda delle varianti tecnologiche. Se verticali, il cassero viene chiuso alle due estremità con un'asse dello spessore della parete, per il primo blocco, mentre dal secondo in poi il blocco precedente viene usato come chiusura di uno dei lati corti, mentre l'altro lato viene tappato con un asse. In caso di giunti obliqui, il cassero non viene tappato sui lati corti e la parte eccedente la lunghezza del cassero viene tagliata in modo da formare un angolo di circa 45° sul quale verrà poi ripreso il blocco successivo. In questo caso il corso successivo viene compattato partendo dall'angolo opposto al precedente in modo da poter specchiare l'inclinazione del giunto. Quest'ultimo tipo di tecnica è molto diffuso in Francia e Germania, ma anche in Spagna.

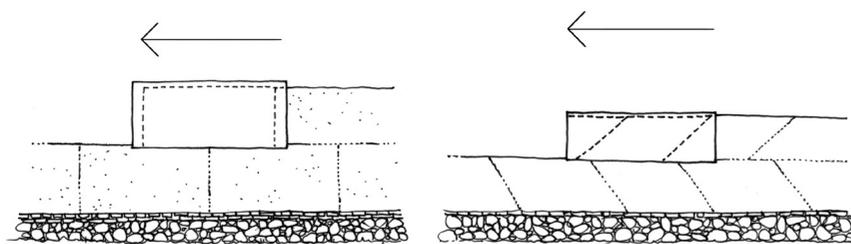


Fig. 2.14, Procedura per la realizzazione dei setti murari in terra battuta. (da Bollini 2013)

Poiché la struttura deve funzionare in modo scatolare, è fondamentale prevedere una forma di ammassamento dei corsi di blocchi negli angoli. Una delle soluzioni tecniche più comuni è quella di ammassare i blocchi nell'angolo avendo cura di sfalsare i corsi sovrapposti, altre soluzioni prevedono l'uso di elementi di diversa natura che leghino le due pareti dell'edificio; si tratta in genere di sistemi a calce, lapidei o in laterizio. I laterizi sono disposti a formare una sorta di piramide angolare su cui si innesta il muro in terra battuta, o addirittura in modo da formare una sorta di pilastro angolare ai lati del quale si ammassano due pareti di terra adiacenti, quest'ultimo è un sistema abbastanza comune in Piemonte (Mattone 2010). I sistemi angolari rinforzati a calce sono invece più diffusi in



Fig. 2.15, Francia, Rhône – Alpes, due pareti contigue in pisé, realizzate con tecniche di giunzione d'angolo diverse: con inserzioni di un letto di malta di calce (sinistra) e con rinforzi sempre in malta di calce, ma in forma triangolare (destra).



Fig. 2.16, Francia, Rhône – Alpes, tecnica di rafforzamento degli angoli che prevede l'inserimento di mattoni cotti con un profilo triangolare che riprende quello dei giunti dei blocchi di pisé, in modo da facilitare l'ammassatura con il muro in terra. Viene utilizzato su un lato della parete come elemento di partenza della sua costruzione, e dall'altro come elemento di chiusura (Bollini 2013).



Fig. 2.17, Dombes, Rhône – Alpes, particolare rinforzo angolare con malta di calce. Il sistema ricorda quello "Calicastrado", utilizzato in Spagna, ma in quest'ultimo le pareti sono interamente rivestite a calce (Mileto, Vegas, Cristini, Garcia 2012).

Francia e Germania, e prevedono di gettare della malta di calce all'interno del cassero in angolo, per ogni 2 o 3 strati di compattazione, in modo da rinforzare e preservare l'angolo da eventuali colpi.

Altra variante costruttiva è quella di stendere un letto di malta di calce tra un corso di blocchi e l'altro allo scopo di umidificare la terra sulla superficie superiore dei corsi già realizzati e favorire la presa del corso successivo, così da rafforzare le giunzioni della struttura muraria.

Naturalmente le diverse varianti costruttive, generatesi con il tempo nelle aree geografiche di diffusione della terra battuta, hanno dato vita a un certo ventaglio di tessiture che caratterizzano l'aspetto degli edifici in pisé. In Spagna ad esempio sono stati classificati più di 10 tipologie diverse di tecniche costruttive in terra battuta che determinano differenze importanti non solo nell'aspetto delle murature (Mileto, Vegas, Cristini, García, 2012). Le bucaure per vani finestre e accessi vengono realizzate durante la costruzione spostando il cassero e predisponendo un alloggio per l'architrave; altrimenti, vengono realizzate aperture di dimensioni tali da raggiungere in altezza la trave di distribuzione dei carichi. Quest'ultima soluzione viene spesso utilizzata nelle costruzioni in terra battuta più recenti.

2.3 CARATTERISTICHE E PRESTAZIONI DELLA TERRA BATTUTA

In molte parti del mondo troviamo esempi di architetture in terra battuta, talvolta antichissime, perfettamente conservatisi nell'arco dei secoli: sono la dimostrazione di quanto questa tecnica costruttiva sia durevole, se tecnicamente ben eseguita ed opportunamente curata.

Come per qualsiasi tipo di edificio, anche per quelli in terra cruda è necessario attenersi ad una periodica manutenzione, preservando in particolar modo il manufatto da agenti patogeni dovuti ad infiltrazioni d'acqua per risalita capillare dal terreno, acqua di rimbalzo dalle superfici pavimentate esterne, ruscigliamento e da eventuali danni al sistema di copertura. Una delle regole fondamentali per la manutenzione di edifici in terra battuta, ma in terra cruda in generale, è quella di preservare l'efficienza di copertura e zoccolo di protezione alla base. La pioggia battente, a causa dell'elevata densità delle pareti, è in grado di penetrare all'interno del muro solo per uno spessore limitato, dell'ordine di qualche millimetro (Bollini 2013 p. 48), questo significa che, con una manutenzione periodica su questo strato, che può essere considerato di sacrificio, evitando eventuali

fenomeni di erosione, la struttura non è attaccabile in questo senso.

Una buona manutenzione, che preservi l'uniformità della parete, assicura il sistema costruttivo anche contro eventuali infiltrazioni di animali o vegetali.

La compattezza della parete e la natura del materiale conferiscono a questa tecnologia una considerevole resistenza al fuoco (Houben, Guillaud 1989).

Caratteristiche fisiche

La terra battuta è considerata un materiale "traspirante" a causa delle sue proprietà igrometriche; ha infatti una particolare permeabilità al vapore ed un fattore di resistenza al vapore acqueo di 5/10. Queste caratteristiche, unite alla capacità di assorbire velocemente quantità di umidità anche elevate restituendole all'ambiente nel momento in cui l'aria dovesse risultare eccessivamente secca, permettono di mantenere il tenore d'acqua interno alla parete in equilibrio con l'ambiente circostante. Grazie a questa proprietà le pareti in terra battuta sono in grado di controllare e regolare il grado di umidità e la temperatura dell'aria negli ambienti interni, rendendoli salubri. Al fine di preservare queste proprietà e di assicurare il buon funzionamento della struttura, le superfici interne andrebbero lasciate nude o, eventualmente, rivestite con intonaci o altri componenti edilizi a base di terra. Per eventuali rivestimenti esterni è opportuno evitare di utilizzare materiali con un alto fattore di resistenza alla diffusione del vapore per non rischiare che l'umidità possa rimanere bloccata all'interno della parete e condensare con la possibilità di generare dissesti strutturali e, con il tempo, il collasso della parete. In caso di murature spoglie ed omogenee non esiste il rischio di formazione di condensa (Röhlen, Ziegert 2011).

La densità a secco dipende dalla tipologia di terreni usati, dal tenore d'acqua durante la compattazione e dalla forza di compattazione: secondo i dati reperibili in letteratura può variare da 1700 a 2400 Kg/m³ (Houben, Guillaud 1989; Walker, Maniatidis 2003; Röhlen, Ziegert 2011). Per raggiungere il contenuto ottimo di umidità in fase di compattazione si possono effettuare prove da campo⁴, oppure test in laboratorio applicando la prova Prova Proctor standard o modificata (UNI EN 13286-2:2005; CNR BU 69/73). La prova permette di stabilire il contenuto ottimale d'acqua da aggiungere a un determinato tipo di suolo secco in modo da ottenere la massima densità possibile in fase di compattazione. In realtà, siccome la densità a secco dipende anche, come detto, dalla forza di compattazione, è molto difficile ricondurre i valori ottenuti durante la prova alla pratica costruttiva (Walker, Maniatidis 2003 p.12); la prova Proctor modificata si considera più appropriata in caso di compattazione con pistoni pneumatici, a causa della maggiore forza di compattazione applicata, mentre la Proctor standard restituisce valori percentuali di acqua troppo alti.

A causa della sua densità e dello spessore elevato delle pareti, che implica una massa considerevole, la terra battuta non ha buone proprietà isolanti. Walker e Maniatidis (Walker, Maniatidis 2003, p.19) riportano valori di resistenza termica tra 0.35 e 0.70 m²K/W. I valori di conducibilità termica riportati in letteratura sono piuttosto alti e variano in funzione della densità a secco, è impossibile in questo senso pensare di soddisfare le prestazioni indicate dalle normative vigenti in merito; Röhlen e Ziegert calcolano che per raggiungere i valori di conducibilità imposti dalle

⁴ Si rimanda alla descrizione delle prove da campo, capitolo 7, pp. 168-170

norme tedesche⁵ (EnEV 2009), che si attestano intorno ai 0.28 W/m²K, sarebbe necessario un muro spoglio in terra battuta di 480 cm di spessore, per densità di 2200 Kg/m³ (Röhlen, Ziegert 2011, p. 172) . Ciò nonostante essendo caratterizzate da forte inerzia termica e capacità termica, proprio per la loro elevata massa, densità e calore specifico, le murature in terra battuta permettono di accumulare una grossa quantità di calore al proprio interno e di restituirla agli ambienti con uno sfasamento orario particolarmente elevato. Inoltre, in particolar modo durante il periodo estivo, le pareti in terra cruda riescono a ridurre significativamente i picchi di temperatura dell'aria esterna, mantenendo negli ambienti interni una temperatura pressappoco costante⁶.

In letteratura, alla terra battuta sono attribuite anche buone qualità di isolamento acustico a causa del modulo di elasticità piuttosto basso.

Proprietà meccaniche della Terra battuta		
Densità a secco ρ	Kg/m ³	1600 - 2400
Resistenza a compressione δ	N/mm ²	1.5 - 3.0
Resistenza a taglio	N/mm ²	0.5 - 1
Resistenza a trazione	N/mm ²	0.5 - 1
Modulo di Elasticità E	N/mm ²	500 - 800

Tab. 2.1 Proprietà meccaniche della terra battuta, Fonte: Röhlen, Ziegert 2011; Bollini 2013.

Caratteristiche meccaniche

G. Bollini (Bollini 2013), pone l'accento sull'importanza della resistenza a compressione e della resistenza all'acqua e fa notare come le prove generalmente effettuate in laboratorio, su campioni o singoli elementi di parete, tendano a sottostimare le qualità meccaniche del materiale terra battuta. I test ricalcano infatti quelli effettuati per il calcestruzzo senza adattamenti e non tengono conto del comportamento in opera dove questa tecnica costruttiva ha dato invece prova di eccezionale durabilità.

La resistenza a trazione non viene generalmente presa in considerazione perché ininfluente; essendo molto bassa le strutture in terra battuta non vanno progettate per resistere a questo tipo di sforzo. Anche la resistenza a flessione è bassa e si assume uguale a 0 per alcuni autori, così come quella a taglio (Walker - Maniatidis 2003 pp. 16), mentre altri riportano valori da 0,5 a 1 N/mm² (Houben - Guillaud 1994, Bollini 2013).

La resistenza a compressione dipende principalmente dalla distribuzione dei vuoti nella miscela di terra a compattazione avvenuta, dal tipo di argille presenti, dal tipo e dimensioni degli inerti, oltre che dal tenore d'acqua

⁵ Le norme tedesche cui fanno riferimento Röhlen e Ziegert sono le EnEV (Energieeinsparverordnung) del 2009.

⁶ Per approfondimenti si rimanda al paragrafo 6.3, p. 139, dove vengono mostrati i risultati di un monitoraggio termico eseguito su una cascina in terra battuta a Novi Ligure (AL),

durante la compattazione e dalla densità ottenuta. I valori riscontrati in letteratura indicano una resistenza a compressione per la terra battuta di 1.5 - 3.0 N/mm² (Röhlen - Ziegert 2011) che tende ad aumentare con il lento procedere dell'essiccazione; si stima che dopo un anno possa aumentare del 40% e dopo due anni fino al 50% (Houben - Guillaud 1994).

Proprietà fisiche della Terra battuta		
Densità a secco ρ	Kg/m ³	1600 - 2400
Conducibilità termica λ	W/mK	0.7 - 1.6
Trasmittanza termica U	W/m ² K	1.35*
Coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo μ	N/mm ²	5/10
Calore specifico c	KJ/kgK	0.85 - 1
Smorzamento onda termica (f) (muro 40 cm)		0.1 - 0.3
Smorzamento onda termica (ϕ) (muro 40 cm)		10-12
Fonoisolamento	dB	50**; 57***

Tab. 2.2 Proprietà fisiche della terra battuta, Fonte: Röhlen, Ziegert 2011; Bollini 2013; Houben, Guillaud 1994

* Per densità 1900 e spessore del muro di 50cm, intonacato su entrambe le facce (Röhlen, Ziegert 2011, p.210)

** per muro da 40cm (Houben, Guillaud 1994; Bollini 2013)

*** per muro da 50cm densità 1900 e intonacato su entrambi i lati (Röhlen, Ziegert 2011, p.210)

Densità a secco ρ (Kg/m ³)	Coefficiente di conducibilità termica λ (W/mK)	Calore specifico c (KJ/KgK)	Diffusività termica (KJ/Km2h05)*
1700	0.82	1	37
1800	0.91	1	40
1900	1.00	1	44
2000	1.10	1	47
2100	1.20	1	50
2200	1.40	1	55
2300	1.50	1	59
2400	1.60	1	62

Tab. 2.3 Caratteristiche termiche della terra battuta, Fonte: rielaborazione da Röhlen, Ziegert 2011; Bollini 2013.

* La diffusività termica è calcolata con la formula riportata da Minke (Minke 2006, p. 31).