

■ 1 Terra battuta

(Pisé, Stampflehm)

1.1 Descrizione

La terra battuta o pisé è una tecnica che consente di realizzare murature continue portanti compattando, strato dopo strato, terra umida versata tra assi parallele che fungono da casseri.

Le costruzioni in pisé sono attualmente realizzate — sia in aree in via di sviluppo, sia in paesi industrializzati — con una varietà di procedimenti che, in base alle risorse operative disponibili, vanno dal lavoro completamente manuale alla totale meccanizzazione delle lavorazioni.

Il pisé è una tecnica molto antica, di cui esistono testimonianze — realizzate con principi costruttivi pressoché identici — praticamente in tutto il mondo.

La diffusione geografica e la fortuna nel tempo del pisé — che ne dimostrano l'attualità e la versatilità — sono riconducibili ad almeno tre fattori. In primo luogo la facilità di trovare un tipo di terreno adatto alla realizzazione del pisé; in secondo luogo la minore quantità di acqua, rispetto ad altre tecniche costruttive in terra, necessaria per la sua preparazione; infine la scarsa dipendenza dalla disponibilità di legname.

Il pisé si è presumibilmente sviluppato in Medioriente e si è successivamente diffuso nel Magreb e dalla Spagna in Francia a seguito dell'espansione islamica e delle sue esigenze di rapida fortificazione dei territori conquistati. È tuttavia presente anche in America centrale e Latina, in Australia, nell'India del Nord, nella Cina centrale.

In Europa sono presenti costruzioni in pisé tradizionale in Portogallo, Spagna, Francia, Germania, Svizzera; esistono inoltre esempi nei paesi scandinavi.

In Italia la costruzione in pisé è ampiamente diffusa in Piemonte, nella regione tra Alessandria, Tortona e Novi Ligure.

Alla diffusione spontanea della tecnica si sono accompagnate, in epoca moderna, alcune iniziative di carattere trattatistico e manualistico che hanno formalizzato le procedure esecutive legate a pratiche artigianali e hanno contribuito a rendere trasferibili le esperienze locali, a far conoscere le potenzialità e a mantenere attuali le costruzioni in pisé.

In Francia, nel Settecento Jacques Cointeraux in piena Rivoluzione Francese, al fine di sostenere la costruzione rapida ed economica di manifatture e di villaggi rurali, propose, attraverso studi e saggi sulla messa in opera del pisé, il recupero di questa tecnica che sopravviveva in alcune regioni francesi. Le esigenze di economicità e rapidità di realizzazione, comuni ai paesi investiti dalla prima Rivoluzione Industriale, hanno creato le condizioni per il trasferimento delle conoscenze codificate e delle tecniche a diversi contesti locali.

L'azione di sensibilizzazione culturale, iniziata con la trattatistica, è progredita in un costante processo di evoluzione della tecnica e di sperimentalismo che vede in alcuni centri

di ricerca e imprese gli attuali punti di diffusione e di codifica scientifica delle conoscenze sviluppate attraverso le esperienze operative.

Il pisé sta conoscendo una importante diffusione negli USA e in Australia, dove sono state messe a punto delle tecnologie che ne velocizzano molto la messa in opera; questa rinascita è testimoniata dalla nascita di diverse imprese specializzate. In Europa il pisé è stato riscoperto in Francia, grazie al lavoro di *CRATerre* e dell'associazione *Pisé Terre d'Avenir*. L'associazione *Acroterre* ha eseguito degli studi sulla possibilità di prefabbricare dei blocchi di pisé.

In Francia, nel campo del restauro e della salvaguardia del patrimonio locale costruito in terra queste associazioni hanno organizzato un servizio di informazione, documentazione, censimenti del costruito e visite di studio, nonché consulenze a proprietari o possibili acquirenti di costruzioni in pisé, sostenendo studi di architettura ed imprese specializzati nella ristrutturazione di edifici realizzati con questa tecnica.

In Italia le costruzioni in pisé sono numerose in Piemonte (si parla del 30% del costruito tra Tortona, Alessandria e Novi Ligure, tra cui molti edifici urbani) gran parte delle quali ancora abitate. Tuttavia, nonostante alcune ricerche eseguite da alcuni docenti del Politecnico di Genova, Milano e Torino, queste abitazioni sono ancora poco studiate e conosciute, vittime di interventi di ristrutturazione che spesso ne accelerano il degrado e che lentamente sostituiscono la terra con altri materiali.

All'estero appare un maggiore interesse per questa tecnica: realizzazioni recenti in pisé sono state eseguite in Danimarca, Austria e Svizzera. In particolare, in Austria l'architetto Martin Rauch utilizza una tecnica meccanizzata che velocizza la messa in opera ed esegue delle gettate di terre dai diversi colori; in seguito, dei trattamenti manuali mettono in risalto la colorazione e la *texture* della parete, lasciata a vista anche in esterni.

Il pisé è particolarmente indicato in zone calde o con escursioni termiche giorno/notte molto elevate.

Nelle zone fredde, con un buon isolamento applicato esternamente, la tecnica del pisé permette di accumulare il calore prodotto all'interno di serre o generato da stufe durante il giorno, mantenendo una temperatura costante durante tutto l'arco della giornata.

La tecnica del pisé, se sviluppata secondo logiche di razionalità, consente di produrre manufatti economici, realizzabili all'interno di cantieri sia di autocostruzione, sia altamente specializzati e utilizzanti sistemi innovativi, come alcune esperienze australiane stanno attualmente dimostrando.

1.2 Campi di utilizzo

Campi di utilizzo	Classi di unità tecnologiche	Note	Classi di elementi tecnici	Funzioni
Interventi sull'esistente in pisé	Struttura portante	1.1	Strutture di elevazione verticali	Portante
		1.2	Solai su terra	Accumulo Regolazione del microclima interno Finitura
	Chiusura	1.3	Pareti perimetrali verticali	
		1.4	Coperture	
	Partizione interna	1.5	Pareti interne verticali	Divisione degli spazi interni Controventatura Accumulo Regolazione del microclima interno
		1.6	Solai	Accumulo Livellamento Isolamento acustico
Interventi sull'esistente	Struttura portante	2.1	Strutture di elevazione verticali	
		2.2	Solai su terra	Accumulo Livellamento Finitura
	Chiusura	2.3	Pareti perimetrali verticali	Accumulo Regolazione del microclima interno Isolamento acustico
		2.4	Copertura	
	Partizione interna	2.5	Pareti interne verticali	Divisione degli spazi interni Regolazione del microclima interno Controventatura Accumulo
		2.6	Solai	Accumulo Livellamento Isolamento acustico

Campi di utilizzo	Classi di unità tecnologiche	Note	Classi di elementi tecnici	Funzioni
Nuove realizzazioni	Struttura portante	3.1	Strutture di elevazione verticali	Portante Accumulo Regolazione del microclima interno Isolamento acustico Finitura
		3.2	Solai su terra	Accumulo Livellamento Finitura
	Chiusura	3.3	Pareti perimetrali verticali	
		3.4	Copertura	
	Partizione interna	3.5	Pareti interne verticali	Divisione degli spazi interni Controventatura Accumulo Regolazione del microclima interno Isolamento acustico Finitura
		3.6	Solai	Accumulo Livellamento Isolamento acustico

Annotazioni:**Interventi sull'esistente in pisé***1.1 Strutture di elevazione verticali*

Nel caso di dissesto della muratura portante, specie negli innesti delle murature d'angolo e nei giunti verticali tra blocchi, è possibile intervenire in tre modi:

- rinforzando l'angolo con inserimento di catene in legno realizzate sottraendo uno strato di pisé o con tiranti e piastre (bolzoni) in metallo non ossidabile;
- contrastando le spinte delle murature con setti murari;
- demolendo e ricostituendo la muratura con gli opportuni ammorsamenti dei corsi.

Interventi sull'esistente in pisé*1.2 Solai su terra**1.6 Solai***Interventi sull'esistente***2.2 Solai su terra**2.6 Solai***Nuove realizzazioni***3.2 Solai su terra**3.6 Solai*

Per migliorare le prestazioni di isolamento acustico, la terra battuta può essere utilizzata per riempimenti e livellamenti dei pavimenti, ricoprendola poi con materiali traspiranti. Inoltre, se si ricorre a materiali di finitura ad alta conduttività, si migliora la funzione di accumulo del solaio.

Con particolari accorgimenti è anche possibile lasciare la terra a vista in locali con particolari funzioni, nei quali non sono previsti l'uso d'acqua o lavaggi frequenti.

In questo caso l'esecuzione del pavimento deve essere fatta con grande cura, per strati successivi a granulometrie sempre più fini; la terra dell'ultimo strato viene miscelata con una piccola percentuale di olio di lino, circa il 6% secondo Minke (1995).

In seguito è opportuno eseguire un trattamento superficiale protettivo con cera naturale che ha l'obiettivo di aumentare la resistenza allo sfregamento. Questo tipo di finitura necessita di una costante manutenzione. Deve essere tuttavia considerato il fatto che una forte compattazione eseguita con una apposita attrezzatura consente di realizzare superfici maggiormente resistenti agli urti e meno assorbenti.

Esperienze americane invece suggeriscono di eseguire la finitura dei pavimenti in terra cruda mediante un misto di olio di lino caldo (circa il 50%) e cera d'api (circa il restante 50%) da stendere sul pavimento compattato e da far assorbire. In Austria l'artista Martin Rauch produce da diversi anni, come elemento di finitura, mattonelle in terra cruda compressa che vengono, una volta posate, protette da uno strato di cera. Devono in ogni caso essere previsti dei giunti ad una distanza massima di 1 mt. in modo da evitare fessurazioni dovute al ritiro durante l'essiccamento. Questi giunti possono essere realizzati in legno o in altri materiale e possono offrire l'occasione per la realizzazione di effetti decorativi.

Pavimenti in terra sono stati generalmente utilizzati in locali non di abitazione (rimesse, depositi, ecc.), mentre solo raramente sono ritrovabili in edifici moderni ad uso residenziale. Per questo si suggerisce di limitare l'eventuale uso di questi tipi di pavimenti essenzialmente a cantine, o a particolari spazi espositivi per i quali non è richiesta una particolare durata.

Nel caso siano realizzati su solai lo strato sarà più sottile e sarà necessario verificare la capacità di portata del solaio stesso prima di procedere alla compattazione, specie se si utilizzano compattatori meccanizzati.

Interventi sull'esistente in pisé

1.6 Solai

Nelle soluzioni di solaio a volta, la terra, insieme a inerti, aveva nelle antiche realizzazioni la funzione di riempimento, mentre da sola veniva utilizzata per costituire massetti di livellamento. In questi casi può presentarsi oggi la necessità di ricostituire la planarità della superficie di livellamento. L'intervento consiste nell'umidificare lo strato esistente e nello stendere un nuovo strato di terra di circa 3-4 cm che diventa di 1 cm circa una volta compattato. La compattazione può essere eseguita tramite mazzeranghe in legno o tramite compattatori meccanizzati, purché si verifichi preventivamente la capacità di carico e lo stato di conservazione del solaio.

Nei solai a travi portanti la terra può essere utilizzata come riempimento e per migliorare l'isolamento acustico. In questo caso può essere anche utilizzata terra in granuli secchi o umidi.

Interventi sull'esistente in pisé

1.2 Solai su terra

Interventi sull'esistente

2.2 Solai su terra

Nuove realizzazioni

3.2 Solai su terra

È possibile realizzare pavimenti in terra battuta qualora si sia in presenza di interventi su edifici privi di piano cantina o di vespai. Si realizza uno strato drenante in ghiaia per eliminare la risalita capillare e strati sottili in terra che vengono compattati per mezzo di una piastra vibrocompattatrice o di un rullo compattatore.

Devono essere assunte alcune precauzioni: evitare l'uso di macchine per la compattazione troppo pesanti o che uniscono alla compattazione vibrazioni; non compattare strati di terra asciutta o strati di terra sottile (meno di 5 cm) posti su strati asciutti poiché si potrebbero verificare fenomeni di polverizzazione dello strato secco. Per evitare fessurazioni durante l'essiccamento, devono essere previsti giunti di dilatazione e la terra può essere miscelata a olio di lino per renderla più elastica. L'olio di lino inoltre viene utilizzato

per impermeabilizzare leggermente la superficie di finitura. Quantità eccessive di olio di lino scuriscono la terra e danno difficoltà di essiccamento; è dunque preferibile trattare superficialmente la terra con cera naturale.

Gli effetti delle dilatazioni possono essere controllati anche attraverso la realizzazione di giunti realizzati tramite telai a vista in legno a maglia stretta (per esempio 30 x 30 cm, 50 x 50 cm). Questi consentono, anche grazie all'utilizzo di terre di diversa colorazione, la realizzazione di motivi decorativi; motivi che possono essere ottenuti anche tramite la realizzazione dei giunti tramite corde che vengono rimosse a compattazione avvenuta. Le tracce lasciate da queste possono venire riempite con materiale elastico diverso (cera miscelata a pietre, argille miscelate a olio di lino, impasto di terra di varia colorazione, ecc.).

Interventi sull'esistente

2.3 Pareti perimetrali verticali

2.5 Pareti verticali interne

È possibile realizzare pareti ad accumulo a ridosso di murature esistenti o isolate, per accumulare calore, sia da incidenza diretta della radiazione solare (qualora di fronte a una finestra), sia emesso da fonti interne attive (stufe, caminetti) e passive (serra). Nel caso della serra la parete in pisé può essere anche addossata alla muratura esistente; in questa eventualità la sua funzione è quella di accumulo e regolazione del microclima interno alla serra. Più sovente il pisé può essere realizzato con la funzione di separare lo spazio interno da quello della serra; in questo caso la parete ha la funzione di regolazione e di accumulo per entrambi gli ambienti.

Qualora si realizzino pareti in pisé contro murature esistenti è necessario considerare i problemi di essiccamento e dunque realizzare pareti sottili (massimo 15 cm) oppure predisporre un'intercapedine aerata tra i due muri per consentire l'essiccamento sui due lati.

1.3 Caratteristiche fisiche e meccaniche

■ Caratteristiche	■ Valore	■ Note	■ Fonte
Peso specifico	1800 — 2100 Kg/mc		
Calore specifico	1 (kJ /kg K)	Per 2000 kg/mc	Sia, 1994, p.30
Capacità di accumulo (c)	1800/2100 KJ/mcK		
Coefficiente di conduttività termica	0,91 — 1,13 (W/mK)	Per 1700-2200 kg/mc	CRATerre, 1989, p.148
	0,95 (W/mK)	Per 2000 kg/mc	Sia, 1994, p.30
	0,93 (W/mK)	Per 2000 kg/mc	DIN 18 953
Coefficiente di sfasamento	10-12 h		CRATerre, 1989, p.155
Coefficiente di abbattimento acustico	60 dB	Per un muro di 20 cm a 500 Hz	CRATerre, 1989, p.148
	50 dB	Per un muro di 40 cm a 500 Hz	CRATerre, 1989, p.148
Coefficiente di permeabilità al vapore μ	10-11	Per 2000 kg/mc 20°C e 60% U.r.	Sia, 1994, p.28

■ Caratteristiche	■ Valore	■ Note	■ Fonte
Coefficiente di diffusività del vapore	0.07-0.06 (mg/m h Pa)	Per 2000 kg/mc	Sia, 1994, p.28
Resistenza a compressione	1,8 KN/mm ²		Minke, 1985
	2-5 N/mm ²	Per terra secca dopo 28 giorni, + 40% prima di un anno, + 50% prima di due anni. Prova a barretta su pisé compresso a 90-95% Proctor Standard	CRATerre, 1989, p.148
	0-5 N/mm ²	Per terra umida dopo 28 giorni (24 ore...). Prova vedi sopra.	CRATerre, 1989, p. 148
	3 N/mm ²	Per 1900 kg/mc	DIN 18 954
	4 N/mm ²	Per 2200 kg/mc	DIN 18 954
	8 N/mm ²	Per pisé stabilizzato con cemento (Terrastone)	S.S.B., 1995, p.110.
Resistenza a trazione	0,5-1 N/mm ²	Prova a barretta su pisé compresso a 90-95% Proctor Standard	CRATerre, 1989, p. 148
	1-2 N/mm ²	Per terra secca a 28 gioni. Prova brasiliana	CRATerre, 1989, p. 148
Resistenza a flessione	0,5-1 N/mm ²	Per terra secca a 28 giorni	CRATerre, 1989, p. 148
Resistenza al fuoco (F)	F 180	Per 2000 kg/mc e 25 cm di spessore	Sia, 1994, p. 33
	F 120	Per 2000 kg/mc e 15 cm di spessore	Sia, 1994, p. 33
	F 90	Per 2000 kg/mc e 12,5 cm di spessore	Sia, 1994, p. 33

1.4 Fattori di valutazione

1.4.1 Costi

I costi di un edificio in pisé dipendono:

- dal *costo del materiale*. L'incidenza di questo fattore sul bilancio complessivo dei costi è minima, in quanto la terra è facilmente reperibile e non richiede processi di tratta-

mento particolarmente costosi. Qualora non si reperisca direttamente nel sito di realizzazione, è possibile rifornirsi di materiale presso gli scavi di altri cantieri (in questo caso si considera solo il costo del trasporto) o presso fornaci e cave, controllando l'origine del terreno. In questo caso il prezzo si aggira attorno alle 40.000 lire al metro cubo (20,66 €). Il costo del materiale dipende tuttavia molto dalla strategia adottata per la sua selezione: si può utilizzare terra adatta senza necessità di ulteriori trattamenti perché proveniente da luoghi di estrazione tradizionalmente utilizzati per manufatti in pisé o perché verificata attraverso prove di laboratorio; si può ricorrere a terre miste che tuttavia possono necessitare di complessi processi di selezione, setacciatura e prova fino a ottenere la miscela adeguata; si possono infine utilizzare terre premiscelate pronte all'uso, ancora tuttavia molto costose;

- dai *costi della mano d'opera*, che rappresentano la percentuale di costo più consistente quando la terra disponibile non è trattata e di conseguenza il processo di trasformazione del materiale avviene direttamente in cantiere. È possibile ridurre i costi di costruzione o velocizzando la messa in opera (razionalizzazione dei sistemi di cassetta e delle attività in cantiere, meccanizzazione attraverso l'utilizzo di compressori pneumatici, elevatori per lo scarico della terra) o realizzando l'edificio in autoconstruzione. Un ulteriore, consistente contributo alla riduzione dei costi deriva da una concezione del progetto attenta agli aspetti realizzativi (modularità degli elementi, collocazione e dimensionamento delle aperture, logistica del cantiere, appropriatezza rispetto alle attitudini operative della manodopera a disposizione);
- dai *costi delle attrezzature di cantiere* che possono essere di proprietà dell'impresa di realizzazione (in questo caso vanno considerati i costi di ammortamento) o affittati (in questo caso si dovrà valutare la velocità di realizzazione);
- dai *costi di trasporto della terra* dal luogo di estrazione a quello del cantiere.

1.4.2 Tempi

I tempi di realizzazione dipendono dalle condizioni di lavoro, considerando che i fattori che più significativamente incidono sono:

- *l'altezza alla quale si lavora*. Operazioni quali il montaggio e smontaggio dei casseri, il riversamento e la distribuzione della terra nei casseri, il sollevamento e fissaggio delle forme per le aperture comportano un tempo superiore man mano che si procede in altezza. L'utilizzo di elevatori o la prefabbricazione dei blocchi a piè d'opera riducono consistentemente i tempi di realizzazione, rendendoli omogenei rispetto a tutte le altezze;
- *la stagione, il clima e il microclima locale*. Non è possibile procedere in altezza operando su una muratura priva dei casseri, se questa non ha raggiunto — attraverso l'essiccazione — la resistenza necessaria a sopportare i carichi e le vibrazioni determinati dalla compattazione dello strato sovrastante. La rapidità di esecuzione è quindi condizionata dal periodo di messa in opera e da fattori climatici locali quali il tasso di umidità dell'aria, la quantità delle precipitazioni, i venti dominanti, l'ombreggiamento, l'orientamento. Un ulteriore fattore condizionante è la sequenza di realizzazione: è opportuno procedere nell'esecuzione dal nucleo interno dell'organismo edilizio verso

l'esterno per evitare il verificarsi di ristagni d'aria. Per ridurre eventuali tempi di attesa per l'essiccamento è possibile evitare di rimuovere i casseri fino alla fine della realizzazione, o utilizzare un cassero totale (ossia alto quanto l'edificio) o realizzare i blocchi compattandoli a piè d'opera.

Deve essere inoltre valutato il tempo di essiccazione totale della muratura per l'esecuzione delle finiture, qualora richieste.

Alcuni studi condotti in Svizzera (Sia, 1994, p.41) riportano per una muratura di 50 cm di spessore realizzata in estate un tempo di essiccamento totale compreso tra le 4 e le 8 settimane.

- la *morfologia dell'edificio*. L'articolazione dell'edificio incide sui tempi di realizzazione, che comunque possono essere ridotti attraverso una attenta concezione degli elementi costruttivi e della loro localizzazione in relazione ai sistemi di cassetta (quantità e collocazione delle aperture rispetto ai setti, sfruttamento di curve e angoli);
- la *modularità dell'edificio*. Il ricorso a dimensioni modulari nella concezione del progetto (ritmo delle aperture, distanza tra giunti, dimensioni di setti, raggi di curvatura e aperture di angoli) consente il ricorso a casseri standard;
- le *attrezzature utilizzate*. Le fasi di trasporto terra, compattazione, montaggio dei casseri e riversamento terra variano la loro durata in relazione al livello di meccanizzazione del processo;
- il *numero e la capacità operativa degli operatori*. Poiché questa tecnica prevede la trasformazione della materia prima in cantiere, gli operatori della realizzazione devono possedere competenze specialistiche o essere guidati da un esperto. L'esperienza e una buona organizzazione sono tra i fattori principali nella determinazione dei tempi di esecuzione.

Complessivamente per la realizzazione di 1 mc di pisé si considerano circa: 6 ore/uomo operando secondo procedure meccanizzate evolute; 10 ore/uomo per procedure di carattere artigianale.

1.5 Prestazioni dei manufatti

• *Inerzia termica*

I manufatti realizzati in terra battuta sono caratterizzati da elevata inerzia termica per via dell'elevato spessore delle murature portanti e dell'utilizzo di terra non alleggerita. Questa tecnica si rivela quindi particolarmente adatta per la realizzazione di murature portanti esterne nelle zone climatiche ad alta escursione termica. Inoltre l'inerzia del materiale fa sì che il calore assorbito dalla parete si distribuisca all'interno con un notevole sfasamento orario: a temperature costanti questo effetto non si nota, ma a climi con grandi escursioni termiche giorno/notte il calore accumulato di giorno viene disperso di notte, e alla mattina la parete è di nuovo fresca, permettendo di mantenere all'interno una temperatura costante, specialmente d'estate.

• *Accumulo di calore*

La presenza di grandi masse di terra non alleggerita consente l'accumulo di calore nelle murature interne, esterne e nei pavimenti. Questa proprietà può essere sfruttata al meglio realizzando manufatti massivi — non rivestiti — posti a sud o all'interno di serre.

- *Isolamento acustico*

I manufatti in pisé, essendo dotati di elevata massa, consentono un buon isolamento sia dai rumori aerei che da quelli da calpestio. La resa acustica del materiale può essere inoltre migliorata agendo sulla qualità delle superfici, per esempio lasciando le superfici interne grezze in modo da aumentare la capacità di assorbimento dei suoni.

- *Isolamento termico*

Questa tecnica non consente di ottenere apprezzabili livelli di isolamento termico. Poiché anche nel caso di un aumento dello spessore della muratura il livello di isolamento termico non raggiunge valori soddisfacenti, nei climi freddi si rende necessaria l'applicazione di pannelli isolanti all'esterno della muratura in modo da non compromettere le prestazioni di accumulo e di regolazione igrometrica. In ogni caso oltre alla prestazione di coibentazione bisogna tenere anche presente, nella valutazione del comportamento termico delle murature in pisé, del loro comportamento di volano termico. Data la capacità della muratura a trattenere umidità, quando le superfici esterne sono colpite dalla radiazione solare, si verifica un fenomeno di evaporazione che comporta l'abbassamento della temperatura della parete, garantendo maggiore benessere nei climi caldi.

- *Facilità operativa*

La messa in opera del pisé comporta la totale trasformazione del materiale in cantiere e necessita di una grande conoscenza tecnica poiché le prestazioni del muro dipendono esclusivamente dalla scelta della terra e dalla sua messa in opera. È quindi necessaria la figura di almeno un esperto. Le operazioni possono essere eseguite da manodopera esperta che garantisce una maggiore rapidità di esecuzione e migliore qualità dei manufatti. Allo stesso tempo però la presenza di numerose operazioni ripetitive consente di fare ricorso anche a manodopera non specializzata (per esempio autocostruttori) purché coordinata e istruita da un esperto.

- *Manutenibilità*

Il fatto che le murature in pisé siano manufatti monolitici, gettati in opera, rende difficoltoso l'intervento manutentivo nel caso di deterioramento a seguito di guasti o patologie.

- *Affidabilità*

Se ben eseguita e in assenza di eventi esogeni (per esempio infiltrazioni dal tetto, risalita capillare dal basamento o cedimento del terreno di fondazione), la muratura in pisé presenta nel tempo una bassa probabilità di guasto.

- *Durabilità*

Sebbene non esistano dati statistici scientificamente raccolti, esistono molteplici esempi di edifici realizzati in contesti europei nei secoli XVIII e XIX; mentre in contesti extraeuropei esistono esempi molto più antichi.

- *Regolazione igrometrica*

I muri in pisé presentano un'azione di regolazione del tasso di umidità interna che si effettua soprattutto nei primi 2 cm dello strato di muratura; di conseguenza per sfruttare questa prestazione è necessario non intonacare i muri interni o eseguire intonaci in terra cruda.

- *Comportamento al fuoco*
I muri in pisé sono praticamente incombustibili. Le norme DIN (18 952) tedesche considerano i manufatti in terra di peso specifico superiore ai 1700 Kg/mc come incombustibili.
- *Salubrità*
Se la terra utilizzata per la realizzazione della muratura in pisé proviene da una zona controllata, non è radiattiva e non contiene rifiuti tossici, le ricerche eseguite non hanno rilevato emissioni dannose per la salute degli abitanti; sono in corso studi per la valutazione delle applicazioni in edilizia che sfruttano la capacità delle argille di agire da depuratori dell'aria interna nell'assorbimento di composti organici volatili.
- *Benessere*
Le pareti in pisé, in virtù della loro elevata massa, permettono di stabilizzare il clima e l'umidità, migliorando il benessere e la salubrità degli ambienti.
- *Riutilizzabilità e riciclabilità*
Le caratteristiche di riciclabilità della terra sono amplificate in questa tecnica dal fatto che le murature in pisé sono costituite da un unico materiale. Non vi sono dunque problemi per la separazione della terra da altri materiali e le murature demolite possono essere riutilizzate direttamente per altri scopi o, previa umidificazione, per la costruzione di nuovi manufatti.
- *Impatto ambientale*
Questa tecnica ha un basso impatto ambientale poiché il materiale viene trasformato in sito, prevedendo limitati trasporti e lavorazioni scarsamente energivore. Il grande quantitativo di terra necessario per le realizzazioni ottenute con questa tecnica può tuttavia comportare problemi qualora gli scavi del materiale siano eseguiti al di fuori di strategie programmatiche. D'altra parte questa tecnica, poiché permette di realizzare murature portanti interamente in terra, riduce notevolmente l'uso di altri materiali naturali (per esempio il legno).
- *Resistenza al gelo*
Le murature in pisé, se essiccate correttamente prima dell'inverno, hanno una buona resistenza al gelo. Rispetto ad altre tecniche di costruzione in terra alleggerita, le consistenti masse terrose realizzate con il pisé hanno una maggiore sensibilità alle variazioni di umidità. Inoltre è importante che la superficie esterna sia ben protetta affinché non assorba l'acqua piovana, causando rigonfiamenti e geli durante il periodo invernale.
- *Resistenza agli attacchi biologici*
L'elevato grado di compattezza che raggiunge la muratura a seguito della compattazione impedisce l'aggressione e la penetrazione da parte di animali e vegetali.
- *Flessibilità*
È possibile scavare aperture (applicando opportuni architravi) in muri già esistenti, benché le modifiche nella distribuzione dei carichi comportino sempre qualche rischio rispetto alla statica dell'intero organismo.

1.6 Aspetti progettuali

La costruzione in pisé è sostanzialmente una costruzione di masse murarie portanti. Un uso appropriato della tecnica del pisé presuppone l'adozione di alcuni principi costruttivi:

- 1) la realizzazione di edifici in pisé è riconducibile alla progettazione delle murature in laterizio o in pietra; nella definizione dei rapporti tra pieni e vuoti devono essere rispettati criteri di allineamento di pieni su pieni, vuoti su vuoti o vuoti su pieni;
- 2) la presenza di pareti senza sporgenze nell'*allineamento in verticale*. Sono raggiungibili altezze notevoli (anche 20 m) dimensionando le murature secondo spessori variabili in relazione all'altezza raggiunta e al carico;
- 3) *masse portanti modulari*. Si tratta della progettazione di spazi realizzati da elementi costruttivi di grandi dimensioni che determinano perimetri scanditi e suddivisi in base alle forme e alle dimensioni dei casseri e prospetti formati da setti accostati (in orizzontale) e sovrapposti (in verticale) che determinano e dimensionano i vuoti e i pieni di muratura.

Questi principi determinano una serie di scelte tecnologiche.

1.6.1 Murature

Dimensionamento: una muratura in pisé non può avere uno spessore inferiore ai 20-30 cm. Lo spessore minimo è determinato — oltre che dai carichi — dalla presenza di sassi che possono compromettere la coesione del materiale e di conseguenza la resistenza del manufatto. CRATerre (1989, p. 254) indica i valori di 30 cm di spessore per la muratura di un edificio a un piano fuori terra e di 45 cm per due piani, mentre Sia (1994, p. 56) indica i valori di 30 cm di spessore per la muratura di un edificio a un piano fuori terra e di 50 cm per due piani.

Opportunamente dimensionata in spessore, la muratura può raggiungere altezze notevoli. Si segnalano a questo proposito l'esempio dell'edificio di Weilburg (Germania) che raggiunge i sei piani fuori terra, o le monumentali mura delle città fortificate del Marocco nelle valli del Dra e del Dades.

Modularità: il dimensionamento dei setti dipende dalle dimensioni dei casseri e dalle condizioni esecutive che determinano misure unificate di riferimento.

Morfologia: una maggiore variabilità nella conformazione delle murature può essere ottenuta ricorrendo a casseri semplici, di piccole dimensioni che consentono una elevata flessibilità operativa e la realizzazione di diversi elementi tecnici (angoli, pilastri, murature lineari e poligonali), alcuni dei quali possono essere realizzati, in alternativa, tramite la predisposizione di casseri speciali. Questi casseri consentono anche la realizzazione di elementi più complessi (pareti curve, angoli ottusi o acuti, nicchie, ecc.). Le diseconomie determinate da queste realizzazioni possono essere ridotte attraverso la ripetizione di questi elementi all'interno dell'edificio.

Orientamento: il pisé può essere utilizzato per l'esecuzione di tutto il perimetro dell'edificio. Tuttavia queste murature, in virtù delle loro caratteristiche di accumulo, sono particolarmente indicate nelle facciate orientate a sud, all'interno di serre o in interni. In climi particolarmente rigidi è consigliabile per le altre esposizioni (soprattutto per le pareti

poste a Nord) prevedere un rivestimento esterno con materiali isolanti o progettare soluzioni miste che vedano la coesistenza di manufatti in terra battuta (posti a Sud) accanto a chiusure realizzate con altre tecniche (per esempio terra alleggerita) o altri materiali. In questo caso la giunzione tra murature diverse non può avvenire per semplice accostamento, ma devono essere previsti appositi ammorsamenti di muratura per evitare fessurazioni causate dai comportamenti diversi dei materiali.

1.6.2 Aperture

Dimensionamento: trattandosi di una muratura piena le aperture andranno previste allineate, con la possibilità di ampliare il rapporto in favore della porzione dei vuoti via via che si procede in altezza. Le aperture di piccole dimensioni (meno di 30 cm) non necessitano di architravi (anche se è sempre consigliabile la loro presenza), mentre per dimensioni superiori è necessaria la presenza di un architrave che poggi sulla muratura per almeno 20 cm su ciascuno dei lati. In alternativa, qualora l'apertura sia ad altezza di piano, il cordolo stesso, dimensionato opportunamente, può fungere da supporto superiore.

CRATerre (1989, p. 263) consiglia di osservare comunque un rapporto tra pieni e vuoti in una muratura non superiore a 1/3, mentre la sommatoria delle lunghezze delle aperture non deve superare il 35% della lunghezza del muro. Sono da evitare aperture troppo ampie. La distanza minima tra un'apertura e un angolo viene valutata in almeno 1 mt, mentre tra due aperture il muro deve avere una lunghezza minima di 65 cm. Il davanzale deve poggiare sulla muratura per una lunghezza pari a quella dell'architrave.

Esistono due possibilità per la realizzazione delle aperture:

- una prima possibilità è quella che consente di ottenerle attraverso il posizionamento di un cassero preformato che permette di ricavare un vuoto durante la compattazione del muro. Questo cassero può essere lasciato all'interno della muratura con funzione di mazzetta o rimosso e riutilizzato per la realizzazione di altri vuoti. In questo ultimo caso è preferibile, per l'economia dei tempi esecutivi, uniformare le dimensioni e le proporzioni delle aperture in modo da ricorrere a un numero limitato di casseri per l'esecuzione. Il muro in pisé si presta particolarmente alla realizzazione di piccole aperture che non richiedono l'inserimento di architravi e che possono essere posizionate con libertà durante la fase di compattazione, senza incidere in modo significativo sui tempi di realizzazione;
- una seconda possibilità è quella che consiste nel realizzarle attraverso l'interruzione della muratura. In questo caso il dimensionamento dipende dallo sfalsamento dei blocchi o dalla distanza tra i montanti dei casseri. È importante inoltre garantire il legame delle murature con il cordolo sovrastante al fine di evitare che le due porzioni di muro si comportino come entità separate.

1.6.3 Protezioni

È importante che la muratura sia protetta da un basamento e da un tetto sporgente. È inoltre necessario predisporre un gocciolatoio sotto l'architrave e sotto il davanzale per impedire infiltrazioni d'acqua nella muratura. Allo stesso scopo, la superficie di appoggio

di davanzali e soglie deve essere protetta con materiali impermeabilizzanti. Sono da evitare sporgenze degli architravi e dei davanzali delle finestre al fine di scongiurare fenomeni di dilavamento dello strato superficiale della muratura adiacente. Nella progettazione è inoltre importante porre attenzione alla prevenzione dei ponti termici e dei fenomeni di condensazione, poiché la presenza di umidità superficiale o interstiziale danneggia e compromette le caratteristiche della muratura.

La muratura esterna deve essere protetta con attenzione. Ai nostri climi è preferibile eseguire sempre intonaci traspiranti a base di calce aerea. In alternativa, in alcuni casi, qualora siano presenti grandi aggetti, è possibile lasciare la muratura a vista proteggendola con trattamenti trasparenti, impermeabili all'acqua ma permeabili al vapore. Trattamenti impermeabilizzanti, come olio di lino o cera naturale, devono essere utilizzati per la protezione di pavimenti, nel caso si intenda lasciarli a vista.

Per la protezione di punti particolarmente deboli (giunti, mazzette, angoli, ecc.) è possibile operare rinforzi con malta di calce densa gettata direttamente nei casseri e successivamente compattata insieme alla terra.

1.6.4 Superfici

Texture: una caratteristica fondamentale del pisé è la sua realizzazione per strati sovrapposti che comporta una particolare tessitura della superficie connotata dalle strisce orizzontali. Questo effetto può essere eliminato eseguendo getti sottili e compattando in modo omogeneo o accentuato eseguendo getti più spessi dello stesso tipo di terra o getti che alternano tipi differenti di terre, o ancora getti sottolineati da giunti di malta o di altri materiali come laterizio o ciottoli o legno.

Altri effetti possono essere ottenuti operando sulla superficie interna dei casseri in modo da ottenere fregi o rilievi sulla muratura. In questo caso è necessario comunque avere cura affinché il disarmo dei casseri non risulti difficoltoso o non provochi imperfezioni e distacchi sulla superficie della muratura.

Ulteriori effetti come graffiti o bugnati possono essere ottenuti operando, immediatamente dopo la rimozione dei casseri, per asportazione o compressione sulla muratura ancora umida.

Colore: il colore di una muratura in pisé dipende dal tipo di terra utilizzato. Va considerato che il colore muta in seguito all'essiccamento. Poiché le superfici possono assumere colorazioni differenti in base alle terre utilizzate, un loro uso alternato consente di ottenere motivi decorativi.