



Costruzioni storico-monumentali in terra cruda

*Proposte per un metodo di valutazione
della vulnerabilità sismica e dell'adeguamento antisismico*

Dottorato di ricerca in

"Conservazione dei Beni Architettonici"

Indirizzo: *"Metodi di valutazione per la conservazione integrata
del patrimonio architettonico, urbano ed ambientale"* XVII° ciclo



Coordinatrice: Prof.ssa Stella Casiello

Coordinatore d'indirizzo: Prof. Luigi Fusco Girard

presso *"Dipartimento di Conservazione dei Beni Architettonici ed Ambientali"*

Via Roma, 402 -80132 Napoli

TUTOR: PROF. LUCIO FINO

DOTTORANDA:
MARIA ROSARIA
GARGIULO

ANNO ACCADEMICO 2006/2007

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II
FACOLTÀ DI ARCHITETTURA

Dottorato di ricerca in:

“CONSERVAZIONE DEI BENI ARCHITETTONICI”

-XVII ciclo-

coordinatrice Prof.ssa Stella Casiello

Indirizzo

“METODI DI VALUTAZIONE PER LA CONSERVAZIONE INTEGRATA DEL
PATRIMONIO ARCHITETTONICO, URBANO ED AMBIENTALE”

coordinatore d'indirizzo Prof. L. Fusco Girard

**COSTRUZIONI STORICO MONUMENTALI IN TERRA
CRUDA. PROPOSTA PER UN METODO DI VALUTA-
ZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA E
DELL'ADEGUAMENTO ANTISISMICO**

Maria Rosaria Gargiulo

Tutor: Prof. Lucio Fino

Tesi presentata per il conseguimento del titolo di Dottore di Ricerca
Napoli, 2006

Dedico questo lavoro a Francesca e Marcello, che mi sono stati accanto in questi anni aiutandomi e sostenendomi nei momenti di sconforto, e ai miei genitori, continua fonte di saggezza.
Colgo l'occasione per ringraziare Lucio Fino, paziente guida per il mio lavoro, Liana Dodaro e Lucia Bove, maestre e care amiche.

Introduzione 1

CAP. 1. COSTRUIRE IN TERRA CRUDA.....	7
1.1. LE PRIME COSTRUZIONI.....	7
1.2. TECNICHE COSTRUTTIVE	9
1.2.a. Terra di tamponamento.....	11
1.2.b. Terra portante:murature.....	14
1.2.c. Terra portante: monolite.....	17
1.3. TERRA CRUDA IN ITALIA	22
1.4. LA CULTURA CONTEMPORANEA DELLA TERRA.	31
1.5. LA TERRA E I TERREMOTI.	36
CAP. 2. CARATTERISTICHE FISICO-CHIMICHE DEI MATERIALI	39
2.1. LA QUALITÀ DELL'IMPASTO	39
2.1.a. L'argilla.....	39
2.1.b. Gli inerti.....	41
2.1.c. Additivi e tecniche di stabilizzazione	42
2.2. DURABILITÀ DELLA TERRA.....	49
2.3. COMPORTAMENTO MECCANICO	55
CAP. 3. CONSERVAZIONE E CONSOLIDAMENTO DI COSTRUZIONI IN TERRA.....	61
3.1. COSTRUZIONI "A REGOLA D'ARTE" PER RESISTERE AI TERREMOTI	61
3.2. TECNICHE DI CONSOLIDAMENTO.....	64
3.2.a. La conservazione dei beni monumentali: il Getty Conservation Institute 64	
3.2.b. Il miglioramento delle prestazioni antisismiche dell'edilizia nei paesi in via di sviluppo e la ricerca svolta presso la Pontificia Università Cattolica do Perù (PUCP) di Lima.....	72
3.2.c. Altri centri di ricerca.....	75
3.3. INTERVENTI DI RESTAURO ESEGUITI SU BENI MONUMENTALI IN ZONA SISMICA. 80	
3.3.a. Argentina-Valle di Calchaquies	80
3.3.b. Muraglia islamica di Juromeda	81
3.3.c. Muraglia nel castello "de Reina", Portogallo.....	82
3.4. NECESSITÀ DI UNA CULTURA DELL'INTERVENTO: IL CASO DI BAM	83
CAP. 4. VALUTAZIONE DEL COMPORTAMENTO SISMICO DELLE COSTRUZIONI IN TERRA	89
4.1. MECCANISMI DI COLLASSO.....	89
4.1.a. Spinta orizzontale – pareti sollecitate nel loro piano	89
4.1.b. Spinta orizzontale – ortogonalmente al piano.....	90
4.1.c. Spinta verticale.....	92
4.1.d. Archi, volte e cupole	93

4.2.	VALUTAZIONE DEL RISCHIO SISMICO: METODI PER LA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ	93
4.2.a.	<i>La misura del danno</i>	95
4.2.b.	<i>La misura della severità del sisma</i>	96
4.2.c.	<i>Correlazioni danno severità del sisma</i>	97
4.3.	ANALOGIE DI COMPORTAMENTO CON LE COSTRUZIONI IN MURATURA ...	103
4.4.	RILIEVO DELLA VULNERABILITÀ SISMICA DI EDIFICI IN TERRA CRUDA: UNA PROPOSTA	104
4.4.a.	<i>Caratterizzazione dei parametri e definizione delle classi di vulnerabilità</i>	105
	Parametro 1: tipo ed organizzazione del sistema resistente.....	105
	Parametro 2: qualità del sistema resistente	106
	Parametro 3: resistenza convenzionale	107
	Parametro 4: posizione dell'edificio e fondazione.....	107
	Parametro 5: orizzontamenti	109
	Parametro 6: configurazione planimetrica	109
	Parametro 7: configurazione in elevazione	110
	Parametro 8: distanza massima fra le murature.....	111
	Parametro 9: copertura	112
	Parametro 10: elementi non strutturali	112
	Parametro 11: stato di fatto.....	113
4.4.b.	<i>Attribuzione dei coefficienti c_{vi} e dei pesi p_i</i>	113
	BIBLIOGRAFIA	117
	APPENDICE 1	139
	BENI MONUMENTALI IN TERRA CRUDA INCLUSI NELLA LISTA DEL PATRIMONIO MONDIALE DELL'UMANITÀ.....	139
	APPENDICE 2	157
	SCHEDE TECNICHE	157
	APPENDICE 3	161
	PROVE TECNICHE DI CANTIERE	161
	APPENDICE 4	164
	SCHEDE DI 1° E 2° LIVELLO DEL GNDT	164

Introduzione

La terra cruda è un materiale adoperato da millenni e con continuità dall'uomo per costruire le proprie dimore, e non solo. Legato all'autocostruzione, ha avuto uno sviluppo notevole nelle civiltà del passato ed oggi è ampiamente diffuso in molti paesi; è il materiale da costruzione più adoperato al mondo: almeno un terzo- forse la metà- della popolazione mondiale vive in costruzioni di terra cruda.



Fig. 1 Alambra di Granata, Spagna (on line: <http://www.donquijote.org/granada/>)

Questo tipo di costruzioni è presente in tutte le aree dove la terra presenta le giuste caratteristiche chimico-fisiche, generando architetture di varia qualità. Per costruire con la terra cruda è necessario un terreno ad alta componente argillosa e, in vista del forte legame esistente in passato tra la reperibilità del materiale ed il suo utilizzo nella costruzione, la terra è stata usata in tutte le aree in cui il suolo presentava le giuste caratteristiche. Numerose e con elevato pregio architettonico sono le costruzioni presenti nel sud della Spagna (Fig.1), in Portogallo (Fig.2) ed in Francia come nell'Europa Orientale. Molte delle affascinanti casbah medio-orientali, come pure tante moschee, andando dal Marocco al Devon e all'India sono costruite utilizzando questo materiale. Anche in America le costruzioni in terra sono numerose e se è facile immaginare il suo utilizzo in Sud America, lo è meno pensare alle costruzioni Canadesi e a californiane o del Nuovo Messico. L'Australia non è da meno, tanto con realizzazioni risalenti alle colonizzazioni che con edifici moderni.

La terra è stata utilizzata con continuità dall'uomo per millenni fino a che, dopo la fine della seconda guerra mondiale, il forte e veloce processo di industrializzazione, che ha prodotto le metropoli, ha tacciato di inadeguatezza le tradizionali tecniche locali, dalle murature alle costruzioni in legno fino a quelle in terra cruda, relegate, nella coscienza comune, alla costruzione di capanne nei paesi in via di sviluppo. Si è persa così, almeno nel mondo occidentale, la pratica costruttiva in terra.



**Fig. 2 Evora, Portogallo (on line:
<http://portugal.sk/bedeker/plancies/evora-abril/slides/evora-abril-03.html>)**

La crisi energetica degli anni '70 ha indotto gli architetti alla ricerca di materiali eco-sostenibili, il cui utilizzo fosse compatibile con l'ambiente e riducesse il consumo di energia in tutta la vita utile del manufatto. Tra questi materiali spicca la terra cruda, studiata in quegli anni in vista di una possibile utilizzazione ed ottimizzazione delle caratteristiche intrinseche di sostenibilità: riduzione del consumo di energia nei processi di produzione del materiale, riciclabilità, alto coefficiente di isolamento termico ed igrometrico, riduzione dei residui di lavorazione, sostenibilità economica. Da allora in poi, diversi enti internazionali si sono impegnati nella ricerca e nello studio delle costruzioni in terra cruda, sia per fini sperimentali che conoscitivi e di conservazione. Infatti se la necessità di utilizzare un materiale dalla alta sostenibilità ha valorizzato queste costruzioni, la ricerca, nelle architetture storiche, del know-how ha favorito la scoperta di opere dall'elevato pregio architettonico e caratterizzanti la cultura costruttiva di alcuni pa-

esi. In merito è giusto sottolineare che circa l'80% (dati ICCROM¹) del patrimonio mondiale dell'umanità è in terra cruda e quindi il problema della loro conservazione assume un ruolo primario.

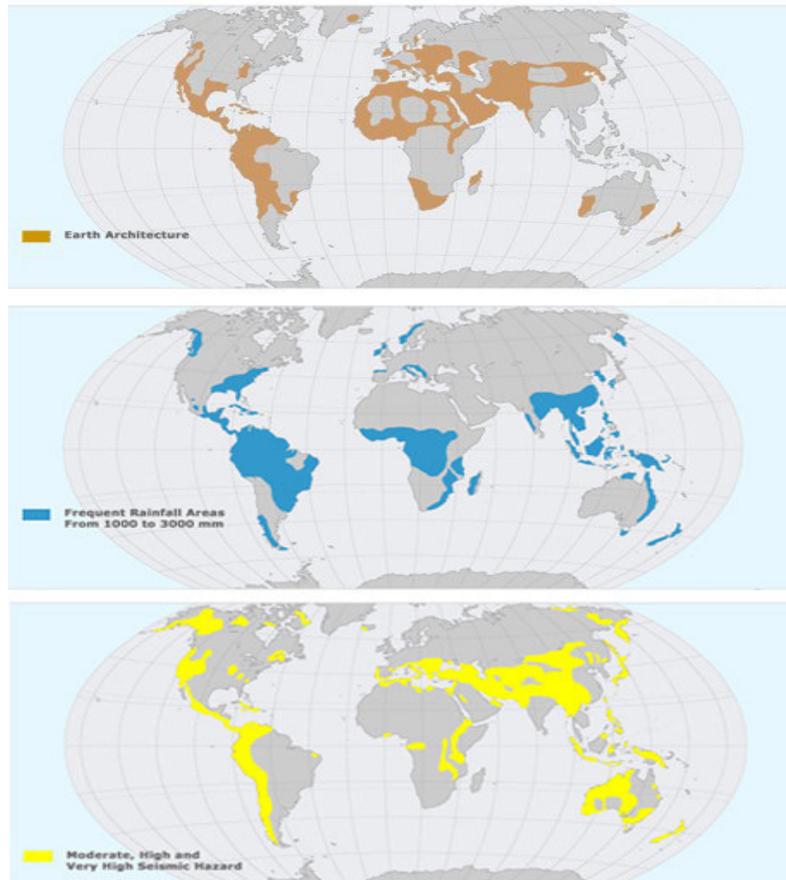


Fig. 3 Mappa di diffusione della terra cruda e mappa delle aree a più alto rischio sismico a confronto (on line: <http://www.terracruda.com/architettura.htm>)

¹ L'ICCROM (Centro Internazionale degli Studi per la Conservazione ed il Restauro dei Beni Culturali) è un organismo internazionale intergovernativo costituito in seno all'UNESCO. In appendice 1 si riporta l'elenco dei siti in terra cruda inclusi nel patrimonio mondiale dell'umanità.

Queste costruzioni sono particolarmente vulnerabili all'acqua, in ogni sua forma, e alle sollecitazioni sismiche. Ma confrontando la mappa di diffusione delle costruzioni in terra con quelle delle aree a più elevato rischio sismico e a più alta piovosità si rileva la loro frequente coincidenza (fig. 3). Di più, spesso, proprio in queste aree, ci sono monumenti e siti monumentali in terra. Un esempio di ciò è la cittadella di Arg-e-Bam, distrutta dal violento terremoto del 26 dicembre 2003 assieme alla parte nuova della città di Bam (Iran) dove diverse zone sono state completamente rase al suolo con diverse migliaia di morti (fig. 4).

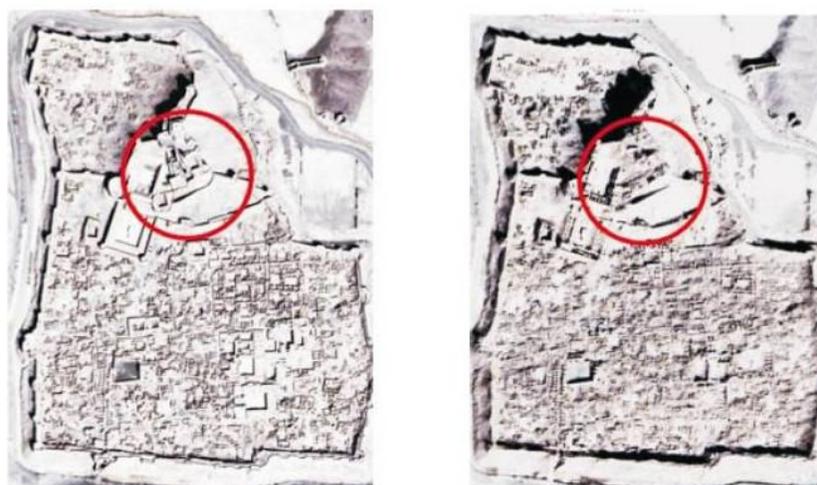


Fig. 4 Vista satellitare della cittadella di Bam prima e dopo il terremoto del 26/12/2003 (Adam et al, 2004)

Nella informazione a mezzo stampa si è letto, in questa occasione come in molte altre, una sorta di accusa nei confronti delle costruzioni in terra per la perdita di vite umane. Se però si osservano le immagini della città prima e dopo il sisma, è facile rilevare come la parte nuova della città sia stata egualmente rasa al suolo e in questa area gli edifici erano costruiti utilizzando tecnologie moderne, calcestruzzo e acciaio (fig. 5), realizzati forse con inadeguate conoscenze e scarsità di mezzi.



Fig. 5 Effetti del sisma di Bam su edifici contemporanei (Adam et al, 2004)

Lo stesso problema, di inadeguatezza e scarsa conoscenza del comportamento antisismico degli edifici, si è rilevato nella parte antica. La cittadella era stata oggetto, dopo l'immissione da parte dell'UNESCO nel patrimonio mondiale dell'umanità, di una serie di interventi di restauro che, al momento del sisma, si sono rilevati totalmente inappropriati: meraviglia infatti come un sisma di 6.5 gradi Richter abbia potuto generare una tale distruzione, soprattutto a fronte del fatto che gli edifici non restaurati hanno mostrato un comportamento migliore, con un quadro fessurativo diffuso, ma senza pervenire al collasso².

Quanto detto lascia intuire la necessità di sviluppare una metodologia di intervento che sia capace di interpretare al meglio il comportamento al sisma di queste strutture prima e dopo l'eventuale consolidamento, basata sulla profonda conoscenza del materiale e delle tecniche di messa in opera.

La presente ricerca, quindi, si è posta come obiettivo l'identificazione di una metodologia di intervento capace di analizzare l'efficienza strutturale delle costruzioni in maniera critica ed analitica e di individuare le appropriate tecniche di intervento.

Per lo sviluppo delle tecniche di consolidamento si terrà conto sia delle ricerche svolte sul consolidamento di edifici monumentali, soprattutto, dall'UNESCO e dal Getty Conservation Institute di Los Angeles (dove si sono prodotti esperimenti su tavola vibrante di moduli in adobe rinforzati con fibre di vetro e/o di carbonio) che delle ricerche, sviluppate prevalentemente in Sud America, tese ad ottenere una pratica costrutti-

² Questo argomento sarà approfondito nel capitolo 3 del presente lavoro

va in grado di garantire un aumento delle prestazioni, sotto sisma, di costruzioni elementari utilizzando materiali facilmente reperibili e di basso costo.

Fatto ciò si svilupperà una scheda per la valutazione della vulnerabilità specifica per le costruzioni in terra cruda e modellata partendo dalla scheda proposta dal GNDT per gli edifici in muratura. La scheda rappresenterà uno strumento per la valutazione dell'efficienza strutturale dell'edificio e dell'opportunità di effettuare degli interventi di consolidamento, partendo però dalle carenze strutturali evidenziate.

Il lavoro è stato articolato partendo dall'analisi del costruito storico sia dal punto di vista storico-geografico che da quello tecnologico-costruttivo (Cap.1). da qui si passa all'analisi chimico-fisico-prestazionale dei componenti che costituiscono la "materia prima" per le costruzioni in terra, includendo gli inerti e gli additivi adoperati per migliorare le prestazioni del materiale (Cap.2). Il Capitolo 3 è invece dedicato all'analisi critica della ricerca finora svolta nel settore del consolidamento e miglioramento antisismico di queste costruzioni. Infine nel 4° Capitolo si sono analizzate le prestazioni sismiche di questi manufatti ed è illustrata la scheda per il rilievo della vulnerabilità antisismica delle costruzioni in terra, analizzando i singoli parametri che la compongono ed attribuendo ad ognuno di essi un peso che concorrerà nella determinazione dell'indice di vulnerabilità.

Cap. 1. Costruire in terra cruda

1.1. Le prime costruzioni

.... E Caino uccise Abele, l'agricoltore "uccise" il pastore. Col passaggio da un modello di vita itinerante ad uno sedentario, nacquero i primi insediamenti urbani. All'inizio si utilizzarono le cavità naturali nelle rocce, poi si cominciarono a realizzare le prime costruzioni tese ad ottemperare alle esigenze primarie di protezione dagli agenti atmosferici e dalle insidie dell'ancora selvaggio mondo naturale. Col legno si costruirono le palafitte, in zone paludose o con fauna particolarmente aggressiva. Poi nacquero le case costruite con materiali minerali che riuscivano a garantire, oltre alla protezione dal mondo naturale anche una certa durabilità dell'edificio e con esse le prime forme di insediamento urbano. La scelta del materiale da adoperare era vincolata alla reperibilità delle materie prime e, molto spesso, la terra, fonte di sostentamento per l'uomo, si configura come il materiale primario per la costruzione delle dimore, tant'è che si può affermare che le prime città sono state costruite in terra. Çatal Hüyük risalente al 6000 a.C. e riscoperta durante una campagna di scavi archeologici nel 1952 è il frutto di una serie di stratificazioni di cui, probabilmente, il primo impianto è addirittura antecedente a Gerico: le case (fig. 6) erano costruite con mattoni ottenuti impastando paglia e argilla, formati in appositi stampi in legno e messi a pre-essiccare al sole.³

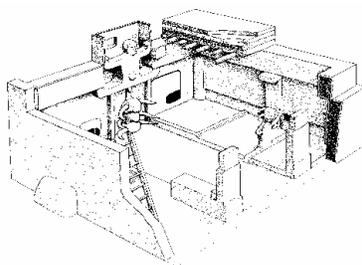


Fig. 6 Ricostruzione di un'abitazione di Çatal Hüyük
(<http://www.terracruda.com/catal.htm>)

³ on line: <http://www.terracruda.com/catal.htm>

La comparsa del mattone essiccato al sole è comune a diverse culture del neolitico, insediamenti urbani in cui era stato adoperato il mattone crudo sono stati rinvenuti in Anatolia, a Creta, in Egitto e nella valle dell'Indo. Nella civiltà mesopotamica, e siamo alla fine del IV millennio a.C., le tombe degli Elamiti erano costruite con mattoni crudi e canne, ma anche le Ziggurat, le torri a pianta quadrata e livelli sovrapposti, erano realizzate con lo stesso materiale, come dimostrano i resti ritrovati a Mari, el Ubad ed Ur (fig.7).



Fig. 7 Ziggurat di Ur (on line: <http://www.crystalinks.com/ziggurat.html>)



Fig. 8 I granai del Ramasseum di Tebe (on line: <http://www.earth-auroville.com/index.php?nav=menu&pg=vault&id1=1>)

In molte delle antiche civiltà, anche le più evolute, la terra rappresentava uno dei principali materiali da costruzione: in Egitto era adoperata per l'edificazione di tutte le costruzioni civili, dalle abitazioni ai luoghi pubblici che non avevano vocazione religiosa. Infatti, in rapporto alla durabilità del materiale, le costruzioni sacre come i templi e le piramidi, di cui si presagiva una durata eterna, erano realizzate con blocchi di pietra, mentre le altre costruzioni, che dovevano durare il tempo che servivano, erano realizzate in mattoni di terra: un esempio interessante sono i granai del tempio di Ramses II in cui è possibile ammirare anche i primi esempi di volte nubiane (fig. 8).

Anche gli etruschi utilizzavano per le loro costruzioni i mattoni di argilla e ciò giustifica anche la quasi completa assenza di reperti archeologici di origine etrusca che riguardino le loro città o le costruzioni diverse dalle tombe e dai templi.

Per diverse ragioni, il nostro materiale è stato adoperato per millenni dalle diverse popolazioni e fino ai giorni nostri.

Nel 1948 Paul Vidal de la Blache pubblica, all'interno di un suo lavoro, una tavola intitolata "Sviluppi autonomi della civiltà – Materiali e sviluppo delle costruzioni"⁴. Sebbene con molte lacune, soprattutto rispetto all'area europea, nelle tavole sono indicate le aree in cui sono rintracciabili le costruzioni in crudo, includendo anche quelle dove gli spazi sono ottenuti per sottrazione di materiale (case scavate). La zona di diffusione delle costruzioni in terra coinvolge una larga fascia del planisfero terrestre, includendo aree di tutti i continenti. Tenendo conto delle successive integrazioni apportate alla mappa negli anni si può notare come il grosso delle costruzioni in terra è presente nell'area inclusa tra il Tropico del Cancro e il 50° parallelo Nord, caratterizzata da una sismicità medio-alta e una grossa presenza di acqua, sia in termini di corsi fluviali che di precipitazioni piovose e la terra è altamente vulnerabile tanto all'acqua quanto alle sollecitazioni sismiche. Questo ha fatto scontrare l'antico costruttore con esigenze pratiche che hanno permesso lo sviluppo di un know-how che tenesse conto delle diverse caratteristiche della materia prima, delle condizioni climatiche, della sismicità dell'area e degli aspetti culturali e tradizionali delle diverse popolazioni. Si è così sviluppata una conoscenza costruttiva che ha, molto spesso, raggiunto espressioni auliche e che non finisce mai di interessare gli studiosi e gli appassionati. Spesso si è cercato di tracciare, o meglio rintracciare, le origini dell'utilizzo di questo materiale e la sua evoluzione ma la contemporaneità e la similitudine di utilizzo della terra in aree completamente diverse e lontane del globo, sia dal punto di vista geografico che culturale, fa apparire, per dirla con Galdieri, la costruzione in terra come "un passo indispensabile" nell'evoluzione dell'uomo, come un fattore comune ai diversi popoli del mondo; sembra quasi che, partendo da situazioni parzialmente diverse, si sia giunti, con metodi e tempi diversi, ad un'unica conclusione: la terra è un materiale da costruzione.

1.2. Tecniche costruttive

Il termine "costruzioni in terra cruda" è generico ed include in se tutte le costruzioni che utilizzano come materia prima una terra prevalentemente argillosa, opportunamente impastata con acqua ed inerti e fatta

⁴ Vidal De La Blache P., 1948, *Principes de géographie humaine*, Parigi, Collin

essiccare al sole. È un materiale ampiamente diffuso e facilmente reperibile e pertanto è stato adoperato in vario modo: in funzione delle caratteristiche del suolo, delle condizioni climatiche, delle tradizioni costruttive e delle esigenze progettuali, si sono sviluppate diverse tecniche di messa in opera, che vanno da quelle che adoperano elementi preformati e di dimensioni ridotte, a quelle per colatura dell'impasto all'interno di casseri, a quelle che utilizzano la terra come rivestimento di strutture in legno. Le tecniche riconosciute e differenziate da CRAT-erre⁵ sono 12 e qui si illustra una catalogazione, già adoperata da CRAT-erre⁶ e da altri, in funzione del ruolo che la terra ha nella struttura (fig. 9).

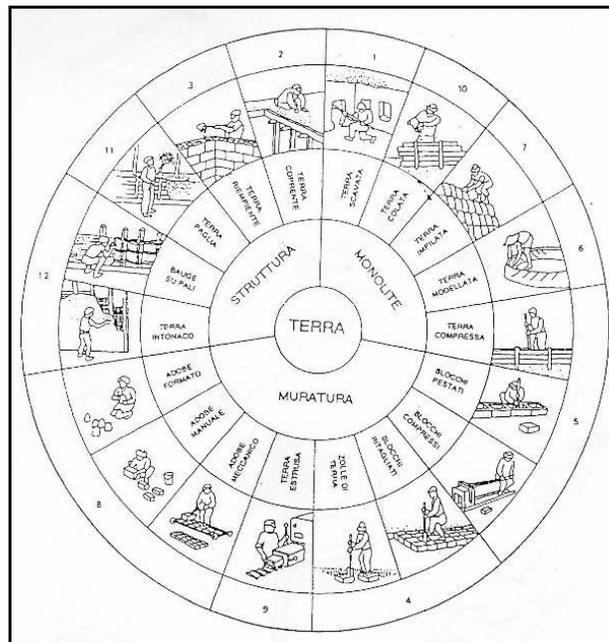


Fig. 9 Quadro sinottico delle tecniche costruttive in terra cruda (Bertagnin, 1999)

⁵ CRAT-erre è una associazione con sede a Grenoble che da anni si occupa dello studio e della pubblicazione sulle costruzioni in terra cruda, collaborando con altre associazioni alle attività dell'ICCROM (Centro Internazionale degli Studi per il Restauro e la Conservazione dei Beni Culturali) per la conservazione del patrimonio in terra dell'UNESCO.

⁶ Houben, H., 1989, *Traité de Construction en terre*, Parenthèses, Marseille.

Innanzitutto si può distinguere tra terra di tamponamento e terra portante. Nel primo gruppo ricadono quelle tecniche in cui la terra è utilizzata per rivestire una struttura principale realizzata con altri materiali. Nel secondo gruppo invece sono incluse tutte quelle tecniche costruttive tese ad ottenere una costruzione con struttura portante in terra. Questo gruppo può essere diviso in altri due sottogruppi, in funzione del comportamento strutturale dei paramenti murari: le pareti possono essere realizzate o con elementi di dimensioni ridotte e comportarsi, a presa avvenuta come delle murature, oppure possono avere un comportamento finale di tipo monolitico.

1.2.a. Terra di tamponamento

In questo primo gruppo si includono tutte quelle tecniche costruttive in cui la terra è utilizzata per ricoprire e chiudere strutture realizzate con altri materiali.

La tecnica più diffusa è il **torchis** (noto anche come Strohlehm o wattle and daub). Un impasto, plastico, di terra e paglia è utilizzato per rivestire una griglia in legno (bambù, nocciolo o salice a seconda delle aree geografiche), fissata alla struttura portante. È adatto alla realizzazione di pareti interne ed esterne ed, in Europa, è stato particolarmente utilizzato in Provenza, per la costruzione dei **Colombage** (fig. 10), ed in Inghilterra, dove prendeva il nome di **wattle-and-daub**.



Fig. 10 Edifici della Provenza francese realizzati con la tecnica del Colombage
(on line: <http://colombages.free.fr/b/24.htm>)

Si tratta di una tecnica molto antica e diffusa, in passato, in molte parti del mondo e che sta vedendo una nuova fioritura nei paesi industrializzati. In Francia e Germania ad esempio vengono commercializzati degli impasti pronti all'uso, mentre in Giappone viene considerata una tecnica nobile in quanto usata, per tradizione, nella realizzazione di templi e case del tè.



Fig. 11 Messa in opera del torchis (on line: <http://www.freewebs.com/torchis/posedutorchis.htm>)

La parte più laboriosa della tecnica del torchis consiste nella predisposizione del grigliato sul quale deve essere posato l'impasto (fig. 11). Per questo motivo, in alcuni paesi, si è pensato di realizzare dei pannelli prefabbricati da applicare direttamente alla struttura a telaio.

Lo spessore massimo solitamente raggiungibile è di circa 20 cm, per cui il torchis è particolarmente indicato per la realizzazione di pareti interne. L'accoppiamento del torchis alle strutture a telaio ligneo è fortunato vista la similitudine tra l'elasticità dei due materiali, inoltre con la sua massa, esso può sopperire alla scarsa inerzia termica che caratterizza le costruzioni con struttura portante a telaio ligneo (Fachwerkhaus o Colombage).⁷

Di origine molto antica è poi l'utilizzazione della terra per realizzare le coperture di costruzioni in legno o pietrame. Si parla in questo caso di terra coprente, includendo: le capanne del Nord Europa, il cui tetto era coibentato con zolle di terra ed erba; le capanne utilizzate come alloggi temporanei lungo le vie delle transumanze; le abitazioni circolari di Banpoo in Cina.

⁷ On line: http://www.qualitaedilizia.it/case_di_terra.html#/Anchor-Torchis-3800

«Diversi tipi di abitazioni africane (Tanzania, Etiopia, Burkina Faso, Nigeria) sono ricoperte da uno strato di terra argillosa battuta. In Islanda ed in Norvegia, le dimore tradizionali in legno conservano le loro coperture in zolle erbose».

Houben H., 1989, pag 186.

Una versione moderna di questo tipo di costruzioni è rappresentata dalle “maison enterrées” di cui l'ampliamento dei quartieri generali dell'UNESCO a Parigi è un esempio.

Di concezione moderna, ed interpretabile come una variazione del torchis è la tecnica della **terra-paglia**: alla paglia, di qualsiasi tipo e sminuzzata per una lunghezza variabile dai 15 ai 40 cm, si aggiunge una boiaccia di terra, privata di tutti i granuli grossi, con il compito di tenere unita la prima. Il dosaggio è di circa 70 kg di paglia ogni 600 kg di terra, per una massa volumetrica approssimativa di 700 kg/m^3 . La terra-paglia è impiegata come riempimento di un'ossatura in legno, distanziata di 15-30 cm. In genere non si è osservato alcun ritiro orizzontale a dispetto di un lieve ritiro verticale dovuto, prevalentemente, alla compattazione del materiale. L'impasto può anche essere colato all'interno di casseri ed utilizzato per il riempimento di strutture portanti in legno. Questa tecnica, oltre ad essere utilizzata per le nuove realizzazioni, è spesso adoperata anche per interventi di restauro, come nel caso di villa d'Orazio (fig.11) a Casalincontrada (CH), opera dell'architetto S. Giardinelli, dove la struttura originaria, fortemente degradata e realizzata a massoni, è stata reintegrata con uno strato di terra-paglia.



Fig. 12 Casa D'Orazio, Casalincontrada (CH) (Foto dell'autore)



Fig. 13 Costruzione pilota realizzata con pannelli prefabbricati a Casalincontrada (CH) (Foto dell'autore)

Sempre di concezione moderna sono i **pannelli prefabbricati** (fig. 12): un impasto di terra e paglia, riconducibile alla terra-paglia, è utilizzato per realizzare, fuori opera, dei pannelli rettangolari dello spessore di 10-15 cm, che vanno poi installati su strutture in legno, spesso in legno lamellare. Questo tipo di procedimento riduce notevolmente i tempi di realizzazione del manufatto anche se incrementa i costi di approvvigionamento dei materiali.

Ancora su struttura si possono mettere in opera i mattoni in terra cruda (adobe) ed il Bouge, ma di queste due tecniche si parlerà in seguito, con riguardo alla “terra portante”.

1.2.b. Terra portante: murature

In questo gruppo si includono tutte quelle costruzioni in cui le strutture portanti sono realizzate con la terra e il loro comportamento meccanico è assimilabile a quello di una muratura. Tra queste tecniche quella più diffusa è l'**adobe** (fig. 14).



Fig. 14 Mattoni crudi: Adobes (on line: <http://www.indianerwelt.de/bilder/adobe.jpg>)



Fig. 15 Tipica costruzione sarda in l'àdiri (on line: <http://www.comunenurachi.it/Territorio/Ilterritorio.htm>)

Il termine adobe deriva dalla parola egiziana *thobe* che significa mattoni. Trasformato in arabo in *attob*, è stato importato in Sud America e poi in tutto il mondo con la designazione spagnola di adobe.

Nella tradizione gli adobe sono elementi di dimensioni ridotte, variabili a seconda dei luoghi, formati a mano o, più spesso, con l'ausilio di forme di legno, costituiti da un impasto di terra, acqua e fibre vegetali (paglia) e/o animali (crine di cavallo) ed essiccati al sole. Questi ele-

menti sono messi in opera interponendo della malta di terra e, anche se il loro utilizzo predominante è quello di costituire delle murature portanti, a volte vengono utilizzati per riempire una struttura portante in legno (fachwerk). La tecnica dell'adobe è molto diffusa nei paesi medio-orientali, in Spagna ed in Sud America (Perù, Brasile, Messico). In Italia gli adobe sono ampiamente utilizzati nel sud della Sardegna, dove sono conosciuti con il nome di *làdiri* (fig. 15), ed in parte del Piemonte. Nel quadro sinottico di CRAT-erre si distingue tra adobe formato, manuale e meccanico, intendendo con questi termini, rispettivamente, i mattoni formati a mano e tra le mani, senza cioè l'ausilio di forme guida, l'adobe di forma prismatica, ottenuto versando l'impasto all'interno di forme di legno di dimensioni standardizzate, e l'adobe interamente prodotto con macchine specifiche.

Uno sguardo alle città presenti in tutta l'area mediorientale (fig. 16-17) o in Sud America (fig. 18), rende l'idea delle possibilità espressive di questo materiale, apparentemente così povero, eppure capace di generare forme architettoniche di estrema bellezza ed arditezza strutturale.



Fig. 16 Ghadames (Libia) (on line: www.ictam.com)



Fig. 17 Casbah della valle di Dades (Marocco) (on line: http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:A%C3%Aft_Benhaddou,_a_Kasbah.JPG)



Fig. 18 Centro storico di Lima (Perù) (foto dell'autore)

Tra le costruzioni in terra cruda quelle in adobe sono sicuramente le più diffuse ed è proprio rispetto a questa tecnica che la ricerca scientifica ha prodotto i maggiori risultati ed innovazioni: si va dall'adobe stabilizzato, ai manuali per l'autocostruzione in adobe⁸, alle ricerche sul miglioramento delle prestazioni sismiche degli edifici con specifiche tecniche di consolidamento per i monumenti⁹.

Frutto delle ricerche tese al miglioramento delle prestazioni meccaniche dei mattoni di terra sono i **blocchi pestati** ed i **blocchi compressi** ottenuti comprimendo la terra, rispettivamente, a compressione manuale o meccanica.

Le murature possono essere realizzate anche con mattoni ottenuti per estrusione: si parla in questo caso di **mattoni estrusi**. La tecnica di messa in opera è simile a quella degli adobe ma il comportamento dei singoli elementi è diverso. Infatti, mentre i primi sono formati con un

⁸ CERESIS, 1999. *Technical Manual for Reinforcement of Existing Adobe Houses in the Coasts and Highlands Regions of Peru*. Available from <http://www.ceresis.org/proyect/madobe/manual.html>;

Minke G., 2001. *Manual de construcción para viviendas antisísmicas de adobe*; Centro Internacional de Investigación para el Desarrollo (CIID), 1998, *Nuevas casa resistentes de adobe*. Pontificia Universidad católica del Perú..

⁹ E. Leroy Tolles, Edna E. Kimbro, Frederick A. Webster, William S. Ginell, 2000, *Seismic Stabilization of Historic Adobe Structures. Final Report of the Getty Seismic Adobe Project*.

impasto di terra, acqua e paglia, i secondi sono ottenuti per estrusione con un impasto che utilizza la terra con la sua umidità naturale. In maniera molto più rudimentale si possono tagliare dei “mattoni” direttamente dal suolo, senza preventivo impasto. Si distinguono due tecniche fondamentali: **zolle di terra** e **terra tagliata**. In entrambe i casi si tagliano dei prismi regolari con l'ausilio di pale o mezzi meccanici, ma nel primo caso i mattoni sono tagliati con lo strato superficiale di erba che è messo in opera verso il basso, mentre nel secondo caso si elimina lo strato superficiale e i mattoni si tagliano per livelli successivi.

1.2.c. Terra portante: monolite

In questa categoria si includono tutte quelle tecniche costruttive che, a messa in opera ed essiccazione concluse, generano delle strutture che hanno un comportamento strutturale di tipo monolitico: terra scavata, terra colata, terra impilata, terra modellata e terra compressa.

Con il toponimo di **terra scavata** si vogliono indicare tutte quelle dimore realizzate per sottrazione di materiale da bacini di terra, quasi sempre terra argillosa. Sono costruzioni troglodite che spesso erano utilizzate come dimore temporanee od anche, in zone desertiche, in prossimità di luoghi con terreni fertili come valida protezione dalle escursioni termiche tra giorno e notte. Si distinguono tra strutture a scavo orizzontale o scavo verticale e, all'esterno possono sia avere le sembianze di caverne che, nei casi più evoluti, presentare facciate simili a quelle di abitazioni “tradizionali”.

La tecnica della **terra colata** consta nel versare all'interno di casseforme in legno un impasto di terra sufficientemente molle come se fosse un calcestruzzo magro: con questa tecnica si possono realizzare tanto delle pareti che delle pavimentazioni. Più raramente è utilizzata per ottenere dei mattoni, perché l'alta percentuale di acqua di impasto genera, a seguito del ritiro, fenomeni di fessurazione sui mattoni.

Il **cob**¹⁰ o **bouge**, a seconda che si voglia utilizzare il termine inglese o quello francese, fa invece parte della categoria della terra impilata: la terra impastata con acqua, paglia e a volte sabbia ad ottenere una miscela plastica, è estratta con una pala e, ulteriormente impastata a mano e

¹⁰ La parola Cob deriva da un antico termine inglese che significa zolla o massa arrotondata.

resa omogenea, è modellata e avvolta nella paglia a formare elementi di dimensioni ridotte pressoché cilindrici. Questi pani sono messi in opera sovrapponendoli per filari successivi e poi fatti aderire l'uno all'altro camminandoci sopra. Per effetto della compressione, si disperde l'acqua d'impasto e gli elementi si amalgamano tra loro ad ottenere un'unica struttura monolitica, estremamente elastica per l'alta percentuale di paglia presente¹¹.



Fig. 19 Antica costruzione in cob del Devon (Regno Unito) (on line: www.cobcottage.com)

Il cob è stato usato per secoli in tutta l'Europa orientale, anche in climi piovosi e con forti venti, fino all'Alasca: costruzioni realizzate con questa tecnica le troviamo nel nord della Francia, dove i Galli già nel 750 a.C. utilizzavano il bauge per il riempimento di strutture lignee, e in Gran Bretagna ed in Normandia questa tecnica è ancora oggi molto diffusa. Nell'XI secolo in Inghilterra il cob era utilizzato come tamponamento di strutture lignee nella tecnica del *wattle and daub* e, a partire

¹¹ Alcune interessanti informazioni su questa tecnica costruttiva sono reperibili sui seguenti siti internet:

<http://cobincornwall.com/index2.htm>,

<http://www.earthedworld.co.uk/modules.php?op=modload&name=News&file=article&sid=4>,

<http://www.cpros.com/~sequoia/>,

<http://www.cobcottage.com/#intro>,

<http://www.greenhomebuilding.com/cob.htm>

dal XV sec, per la realizzazione di muri monolitici nella costruzione non solo di case di contadini ma anche di dimore nobiliari di campagna e, a volte di case in città. Tali costruzioni sono presenti in tutta l'Inghilterra sud-orientale (Cornovaglia, Somerset, Dorset, Hampshire) ed in particolare nel Devon (fig. 19) dove si contano ben 20000 costruzioni in cob tra cui anche scuole e chiese. In Germania la tecnica prende il nome di "wellerlehm" ed è utilizzata per la costruzione di architetture rurali, come pure in Slovacchia dove prende il nome di "nakladana stava" o "lepenice". In Italia le costruzioni realizzate con questa tecnica sono presenti nelle Marche ed in Abruzzo (fig. 20) dove la tecnica prende il nome di **massone**.



Fig. 20 Tipica costruzione in massoni, Casalincontrada (CH) (foto dell'autore)

Fuori dall'Europa, possiamo trovare costruzioni che adoperano questa tecnica in Cina (resti di costruzioni in terra impilata risalenti al XIV sec), in Arabia ed in Iran. Con la tecnica del cob sono poi realizzate le costruzioni della città in terra più affascinante del mondo: Shibam (fig. 21)¹².

¹² E. Francaviglia, De Gregari, 2003, *Adobe e pisè in terra: un confronto Fra Yemen e Marocco*, Costruire in laterizio, n° 92 Marzo/Aprile, pp 52-59.



Fig. 21 Una strada di Shibam (Yemen) (on line: <http://www.gemm.nl/webgemms/00000345.html>)

Nota in tutto il mondo come la New York del deserto, mediamente le case-torri raggiungono un'altezza di 5 o 6 piani, eccezionalmente 8, per un'altezza massima di circa 20 m, presentando una pianta pressoché quadrata con scala centrale che si avvolge intorno ad un nucleo in pietra. Le fondazioni, che poggiano a circa un metro e mezzo al di sotto del piano di campagna, hanno un substrato realizzato con materiale isolante¹³, e sono realizzate in pietra legata da una malta di calce e cenere fino ad un'altezza di 1,5 m oltre il piano di campagna. Al di sopra di questo muro la costruzione continua con gli adobe, realizzati in 5 differenti tagli (da 45x30x6 cm a 20x13x6 cm) in modo da permettere la rastremazione verso l'alto della parete (da circa 100 cm a 25-30 cm).

Attualmente il cob sta vedendo un nuovo sviluppo in Nord America, grazie alle sue caratteristiche di ecosostenibilità ed alle notevoli capacità coibenti¹⁴.

La tecnica più diffusa per ottenere pannelli murari a comportamento monolitico è quella del **pisè** (fig. 22): la terra, inclusi i granuli più grossi che fungono da inerti, è impastata con la sua umidità naturale e ver-

¹³ Secondo R. Lewcock (*Wadi Hadramawt and the walled city of Shibam*, Paris, 1986) il fondo della trincea era realizzato con escrementi e salgemma, mentre S. S. Damluji (*The valley of mudbrick architecture. Shibam, Tarim & Wadi Hadramut*, London, 1992) sostiene che tale impermeabilizzazione fosse realizzata con due strati sovrapposti di gesso bianco e cenere, battuti insieme con un pestello.

¹⁴ A tal proposito si vuole citare l'associazione "Cob Cottage", rintracciabile al sito internet www.cobcottage.com.

sata all'interno di casseri. Dopo aver versato circa 1,20 m di terra si comprime, tradizionalmente con dei pestelli di varia forma, oggi giorno meccanicamente, ottenendo, in tal modo, un notevole incremento della resistenza del materiale (fig. 23).

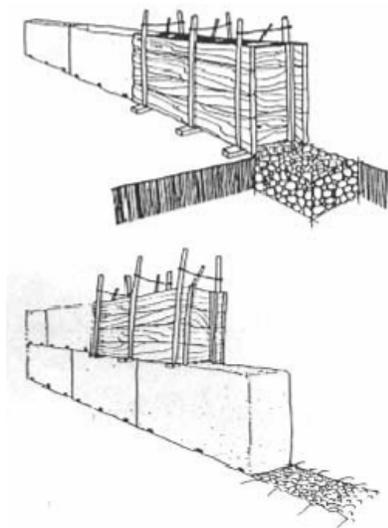


Fig. 22 Fasi di costruzione di un muro in pisè (on line: www.terracruda.com)

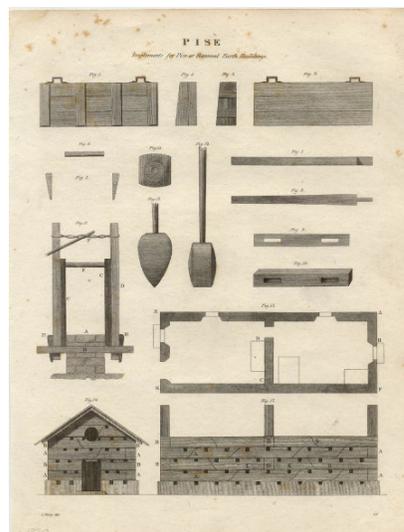


Fig. 23 Attrezzi per la realizzazione di una parete in pisè

Le origini di questa tecnica sono da ricercare nell'“opus signinum” romano, utilizzato sia per la realizzazione di opere di ingegneria militare che per ponti, acquedotti e, in genere, architettura civile, come testimoniato dal libro X del De Architettura di Vitruvio. I grandi divulgatori del pisè furono però le popolazioni medio orientali che lo diffusero in tutta la Penisola Iberica. Grazie ai trattati scientifici pubblicati da François Cointereaux (1740-1830) alla fine del Settecento¹⁵ e poi tradotti in varie lingue, questa tecnica arrivò in Svizzera, Germania, e anche in

¹⁵ Cointereaux F., 1790, *École d'architecture rurale ou leçons par lesquelles on apprendra soi-même à bâtir solidement les maisons de plusieurs étages avec la terre seule*, Parigi.

Italia. Qui, dove Giuseppe Del Rosso¹⁶ pubblica il fascicolo “Dell’economica costruzione delle case in terra”, è conosciuta con il nome di terra battuta ed è particolarmente diffusa in Piemonte, nell’area tra Alessandria, Tortona, e Novi Ligure. Con la tecnica del pisè sono costruiti i tigremt marocchini: strutture a torre in genere di 3 o 4 piani (fig. 24).



Fig. 24 Tigremt a Boumalne (Marocco) (Francaviglia de Gregori E., 1999, p 56)

Notevoli sono state le innovazioni prodotte negli ultimi anni soprattutto ad opera di Martin Rauch, inventore di una tecnica meccanizzata che velocizza la messa in opera e permetta la differenziazione cromatica tra le gettate.

1.3. Terra cruda in Italia

L’uso della terra come materiale da costruzione in Italia ha una tradizione lunghissima testimoniata dai resti di costruzioni di età nuragica (500 – 400 a.c.) della Sardegna, come dagli scritti di epoca classica che raccontano di una prima edificazione di Roma in mattoni crudi: Vitruvio quando parla di “lateres” si riferisce proprio al mattone crudo, di cui vanta le proprietà strutturali e soprattutto di miglioramento delle condizioni di vivibilità dell’ambiente interno e si rammarica dei limiti

¹⁶ Del Rosso G., 1793, “*Dell’economica costruzione delle case di terra, opuscolo diretto agl’industriosi possidenti e abitatori dell’agro toscano*”, edizioni J.A. Bouchard (Ristampa anastatica in M. Bertagnin, 1992, *Il pisè e la regola. Manualistica settecentesca per l’architettura in terra*, Roma, EdilStampa).

ta da capanne e case realizzate in autocostruzione dalle comunità agricole in diverse regioni.

«Le diverse ricerche (...) hanno evidenziato per alcune aree geografiche l'assenza o una limitata presenza di testimonianze relative all'uso della terra cruda. (...). Appare possibile ipotizzare l'assenza di una tradizione costruttiva del crudo in alcuni ambiti regionali, come conseguenza di un'indubbia diversa e diffusa disponibilità materica ma anche di una mancata o perduta influenza culturale del crudo»

Bertagnin M., 1999, p 271

A proposito di architettura rurale in crudo si può citare l'Abruzzo, dove nella parte costiera, tra le province di Chieti, Pescara e Teramo, ed in continuità con la parte meridionale del Molise, c'è una diffusa edificazione che utilizza la tecnica costruttiva del massone, riconducibile al cob. Le case così realizzate, ad uno o massimo due piani, sorgono prevalentemente in aree rurali isolate e raramente generano aggregati di due o tre unità o si attestano nell'edilizia suburbana.



Fig. 26 Quartiere di Villa Ficana a Macerata (on line: <http://www.casediterra.it/documenti.htm>)

Eccezione, in quest'area, è il borgo di villa Ficana (fig. 26) a Macerata (Molise), che si innesta, nella seconda metà dell'Ottocento, in un'area già precedentemente edificata e nasce come nucleo di "case d'affitto" per braccianti che trovavano occupazione nelle campagne limitrofe. Interessanti anche i casoni della Pianura Veneta tra le regioni Veneto e Friuli Venezia Giulia: edifici ad un solo piano in adobe con coperture a padiglione con falde molto inclinate e struttura principale in legno d'abete, finita in paglia (fig. 27-28).



Fig. 27 Edificio in pisè veneti, Arzergrande (PD). (Bertagnin, 1999)



Fig. 28 Edificio in Pisè di Maròn di Brugnera (PN). (Bertagnin, 1999)

Queste architetture hanno rappresentato una costante nel paesaggio rurale e suburbano dell'area fino agli anni '50, quando il progressivo sviluppo delle città ne ha quasi completamente cancellato le tracce: oggi è purtroppo raro incontrare questi edifici se non in aree distanti dai centri abitati.

In alcuni casi le architetture di terra hanno invece avuto una tale diffusione e sviluppo da entrare a far parte dell'impianto urbano delle città. È questo il caso di Novi Ligure, in provincia di Alessandria, dove il centro storico della città è quasi interamente realizzato in terra battuta.

«Nel panorama dell'architettura in terra cruda italiana, il patrimonio costruito del Piemonte assume, sia in termini quantitativi che qualitativi, una particolare rilevanza»

Bertagnin., 1999, p 81

Nell'area compresa tra le province di Torino, Asti ed Alessandria, a sud del Po e lungo i suoi affluenti Tamaro e Bormida, sono diffuse le tecniche costruttive del Pisè, che utilizza la caratteristica terra rossa ad alta

componente ferrosa, e, l'Adobe, che utilizza una terra più sabbiosa e povera di ferro. Nell'area della Fraschetta, oggi nota come piana di Marengo, sono ancora presenti diversi edifici urbani realizzati in Pisè tra il XIX e la prima metà del XX secolo e, da testimonianze storiche è possibile far risalire al XVI e al XVII secolo alcuni di essi.

«L'architettura di terra si connota, in particolare, in questo ambito, per i caratteri di spiccata urbanità, dal momento che molti centri abitati sono costruiti interamente in crudo. Alcuni studi hanno rilevato, ad esempio, come nel centro abitato di Spinetta Marengo, fino agli anni '50, le costruzioni in terra cruda rappresentano la quasi totalità degli edifici esistenti.»

Bertagnin M., 1999, p.85



Fig. 29 Chiesa della SS. Trinità a Spinetta Marengo (AL). (Bertagnin M., 1999)

A testimonianza della urbanità raggiunta dalle costruzioni in terra nell'area della Fraschetta, oltre ai palazzotti urbani, in genere abitazioni multifamiliari a più piani fuori terra con non rare botteghe al piano terra, ci sono scuole, chiese ed alcune cappelle funerarie (fig. 29).

Nel parlare di architettura in terra in Italia non si può certamente trascurare la Sardegna dove, nell'area del Cagliariitano, ed in particolare nella pianura del Campidano, la tradizione costruttiva degli adobe, qui detti ladiri, si è talmente sviluppata da vedere, agli inizi del '900, la nascita

di fabbriche artigianali per la produzione di mattoni crudi. Anche qui, purtroppo, l'uso della terra è andato mano a mano scemando: «le ultime testimonianze relative all'uso dell'adobe in costruzioni ex-novo risalgono infatti al 1958» (Briccoli Bati S., 1997, p53). Tra le città del Campidano un ruolo fondamentale nello sviluppo della cultura della terra ha il centro di Quartu S.Elena, dove alla fine dell'Ottocento, il mattone crudo è utilizzato in abbinamento con ferro, laterizi e cemento armato, per la costruzione di edifici in pieno stile liberty internazionale: nasce il "palazzu"(fig. 30).



**Fig. 30 Villa del Barone Tola (on line:
<http://www.sansperate.net/artcult/architloc.html>)**

I tipi di costruzioni in ladiri del campidano sono fondamentalmente 3. Il primo tipo, e forse il più antico, è quello a corte: un alto muro si estende lungo la strada e su di esso si apre un unico portone che da accesso alla corte interna quasi sempre con un pozzo centrale. L'abitazione è sul lato opposto della corte ed è sempre anticipata da un loggiato porticato. Sugli altri due lati ci sono i locali di servizio: stalla, depositi, arnesi e derrate, a volte un rudimentale mulino a trazione animale. Questo tipo, sebbene inserito all'interno del contesto urbano, deriva le sue caratteristiche da esigenze prettamente rurali. Nell'area dei Campidani Maggiori e del Samaxis, sono poi presenti edifici che, privati della corte, hanno però la stessa distribuzione planimetrica nella parte abitativa: i singoli ambienti si aprono sulla sala, detta *sa lolla*, il loggiato porticato, che li distribuisce (fig. 31).

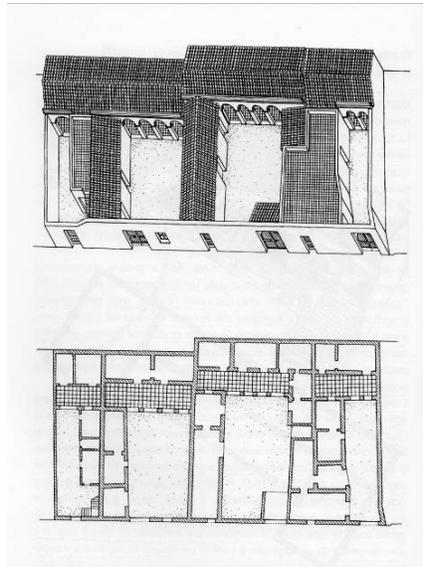


Fig. 31 Schema tipico di abitazione sarda. (Bertagnin M., 1999)

A questo tipo di tradizione si affiancano, nell'Ottocento, due nuovi tipi: la villa e il palazzo. Con il tipo a palazzo, generalmente a due livelli, la corte stradale è costituita dall'affiancamento delle facciate principali degli edifici, generalmente con aperture simmetriche e con portali che, nelle finiture, richiamano la manualistica Ottocentesca. Il tipo a villa invece è presente soprattutto nelle campagne; isolato, è utilizzato per la costruzione delle case di villeggiatura delle famiglie benestanti di città. In essi sono presenti elementi con forte richiamo alla costruzione liberty, spesso realizzati in altri materiali. Sempre all'Ottocento risale la costruzione di alcuni centri industriali in terra, tra cui spiccano le Saline Contivecchi realizzata tra il 1922 e il 1927, derivante dai modelli dell'utopia della modernità, e costituite da un vero e proprio villaggio. Il complesso era costituito da cinque palazzine per i dirigenti e da un aggregato a corte dove trovavano ubicazione i locali comuni e la foresteria.

Se in queste regioni la terra diventa il materiale da costruzione che permea la tradizione costruttiva locale, in altre aree del Territorio nazionale è possibile trovare esempi meno diffusi, ma comunque di quali-

tà, di costruzioni urbane in Terra. In Calabria, nella provincia di Cosenza, agli inizi del '900, sorgono insediamenti di case in Terra, della tipologia in linea, che, per una profondità di otto-dodici metri, si estendono per una lunghezza di circa 100m lungo le strade.



Fig. 32 Vista aerea di Terranova Bracciolini (maggio 1944 I.G.M.)

La Toscana, terra di lunghissima tradizione in terra, testimoniata dai reperti archeologici di origine Etrusca e dalla pubblicazione, nel XVIII secolo, dei manuali di Del Rosso e di de' Vegni, ha oggi una diffusa edilizia rurale in pisè cui si affiancano esempi di costruzioni urbane che, sia dal punto di vista architettonico che urbanistico, trovano la loro più ampia espressione nel centro di Terranova Bracciolini (fig. 32). L'alto livello di organizzazione urbana di questo centro è espressione della lunga tradizione locale testimoniata da documenti che attestano la diffusione delle costruzioni in terra ad uso agricolo ai secoli XII e XIII o , anche, a documenti medievali che narrano di "domum unam de terra tectam de tegulis cum curio, putro et funo" (Bertagnin M., 1999, p.165) risalenti ai secoli XIV e XV. Ma più di tutto le testimonianze archeologiche: a Montelupo sono state rintracciate parti in terra nel palazzo

pubblico antecedente al XIV secolo; a Grosseto sono state rintracciate parti in pisè risalenti al XIII secolo all'interno della Fortezza Vecchia.

«In Italia la tradizione costruttiva in terra cruda è antichissima e risale agli albori dell'antropizzazione di alcuni territori del nostro paese. Fin dal neolitico è, infatti, documentato l'uso del mattone crudo e dell'impiego della terra cruda in edilizia, come testimoniano i numerosi ritrovamenti tra cui quelli pre e protostorici delle isole Lipari, i plinθοι di Velia, le mura di Colle degli Angeli (CS), la villa di Settefinestre a Orbetello (GR), le celle dei templi italici e i rinvenimenti di Eraclea Minoa, Perugia e Arezzo»

Bertagnin M. 1999, p 41

Sicuramente gli Etruschi adoperavano la terra per la costruzione delle loro dimore come i romani, in età preclassica, adoperavano i mattoni crudi per tutte le costruzioni: uno dei vanti di Augusto era quello di aver trovato Roma costruita di terra e di lasciarla di marmo. Varrone, Plinio e Vitruvio ci parlano di costruzioni in terra ancora in piedi ai loro tempi, lodandone la loro stabilità e la struttura.

Parlando di prime costruzioni in Terra in Italia non si possono trascurare le fortificazioni: dall'agger terreus carinarum, di cui ci sono testimonianze in Lazio risalenti al VII e VI sec. a.C., alla sopraelevazione delle mura di Gela (circa 340 a.C.) con grossi mattoni di terra (40 x 40 x 8), alla ricostruzione delle mura di Arezzo nel III secolo a.C. realizzate con mattoni di 42 x 28 x 12cm prima essiccati al sole e poi sottoposti ad una leggera cottura.

«Le mura di Arezzo, delle quali una porzione fu ritrovata quasi per caso nel 1918, avevano già destato la meraviglia di Vitruvio e per noi rappresentano concretamente il momento di transizione dal crudo al cotto»

Galdieri E., 1982, p 192

Le mura di Gela sono sicuramente testimonianza dell'uso da parte dei Greci, dei mattini crudi che furono da loro adoperati per la costruzione sia di abitazioni che delle celle dei templi, almeno fino al VI secolo a.C.: il cotto fu adoperato dai greci solo per influenza romana.

L'uso della Terra prosegue in Italia fino agli inizi degli anni '50, quando le mutate esigenze sociali, abitative e soprattutto la decadenza delle espressioni architettoniche più tarde dell'utilizzo di questo materiale, lo fanno abbandonare completamente.

Oggi c'è anche in Italia un nuovo interesse nei confronti di questo materiale, sia dal punto di vista del restauro delle costruzioni esistenti che del suo utilizzo per nuove. Purtroppo questa attenzione si scontra con un quadro normativo che misconosce il nostro materiale e con uno scarso interesse economico-finanziario e, conseguentemente, politico nei confronti della terra: è ormai da due legislature in discussione al parlamento una legge per l'inserimento della terra cruda tra i materiali da costruzione legalmente riconosciuti.¹⁸

1.4. La cultura contemporanea della terra.

La riscoperta della terra cruda da utilizzare in architettura “Sostenibile” ha generato nuove forme espressive caratterizzate dalla riscoperta e reinterpretazione di antiche spazialità e alla invenzione di nuove tecniche costruttive che tendono a superare i limiti tradizionalmente riconosciuti a questo materiale.

Le architetture di Gernot Minke sono sicuramente un esempio significativo: architetto e ingegnere tedesco, professore alla Università di Kassel e direttore del laboratorio di sperimentazione presso la stessa università, è autore, oltre che di diversi testi sui “materiali” in terra cruda, anche di opere edilizie dove l'utilizzo e la sperimentazione delle nuove tecniche e tecnologie costruttive hanno generato edifici dalla concezione moderna e dalla notevole qualità spaziale. La stessa abitazione dell'architetto è realizzata con una tecnica da lui inventata: delle sacche in garza medica della lunghezza di alcuni metri sono riempite con un impasto di terra umida a granulometria varia. Le sacche prima di essere messe in opera sono massaggiate affinché fuoriesca la parte più fine dell'impasto misto ad acqua che funge da legante tra i vari elementi, messi in opera nella maniera più libera. Con questa tecnica è possibile realizzare tanto pareti rettilinee quanto curve. Le coperture sono poi delle cupole che dall'esterno sembrano delle colline naturali (fig. 33).

¹⁸ G. Bollini, M. Lion (a cura di), 2005, *La costruzione in Terra Cruda in Italia: verso una normativa Nazionale*, Vol I, Roma
M. Achenza, G. Bollini, M. Lion (a cura di), 2005, *La costruzione in Terra Cruda in Italia: verso una normativa Nazionale*, Vol II, Roma



Fig. 33 Residenza studio a Kassel, Germania. (Costruire in laterizio n°92, 2003)

Utilizzando dei conci appositamente sagomati, ha realizzato una cupola a coprire un auditorio dove la forma e il posizionamento dei conci ottimizzano l'acustica della sala per concerti strumentali. Ma Gernot Minke è sicuramente uno dei protagonisti nella ricerca per il miglioramento delle prestazioni sismiche delle abitazioni povere nei paesi in via di sviluppo (P.V.S.).



Fig. 34 Villaggio di New Gurna, Hassan Fathy (on line: http://archnet.org/library/images/one-image.tcl?location_id=1547&image_id=16304&start=19&limit=9)

Quando si parla di architettura contemporanea in Terra non si può dimenticare la figura di Hassan Fathy. Architetto, nasce ad Alessandria, in Egitto, nel 1900. Il suo primo progetto è la “Talkha Primari School”,

ed è autore di diversi libri di architettura¹⁹. Alla base del suo lavoro c'è l'importanza da lui attribuita ai valori umani e all'uso di una tecnologia appropriata per il luogo e il tempo. Assegna un ruolo essenziale alla tradizione e al ristabilimento di una cultura costruttiva nazionale.

La fonte d'ispirazione per le sue architetture è l'architettura del periodo faraonico e l'architettura vernacolare, e i suoi progetti sono basati sull'uso di un vocabolario fatto di elementi morfologici e strutturali presi dalla tradizione: archi parabolici, spazi quadrati coperti con cupole, spazi rettangolari ricoperti con volte, corti e torri del vento.

Sia per il valore che egli attribuiva al lavoro manuale, sia per ragioni economiche, per la realizzazione dei suoi progetti utilizzò le tecniche costruttive tradizionali che riducono al massimo l'utilizzo di macchinari ed utilizzano come materie prime materiali reperibili a basso costo: la terra, la paglia, il lavoro dell'uomo e le pietre: le sue architetture hanno le pareti portanti in adobe con fondazioni in pietra locale o in mattoni cotti. La caratteristica primaria delle sue architetture sono le coperture:

«If the farmer manages to build the walls easily he cannot build the roof as well. The roof requires materials capable of bearing bending moments and tensile stresses such as wood, reinforced concrete etc. These materials aren't locally available and must be bought. Since ancient times people from Egypt, Iran and Iraq conceived a clever system to build roofs with mud bricks thus solving the problem of tensile stress and strength of the material by using the geometry of shape. They built the vault shaped roofs with the profile of a catenary curve thus eliminating tensile stresses and bending moments, and making the vault surface endure the sole compression. They conceived a simple and naïve method to build these vaults, which were erected in space without the need for centrings and supports. They reached this result by building the vault in subsequent rings with the bricks gradually placed on a slightly inclined plane with respect to the vertical axe, leaning on a found wall.»

Steele J, 1997, p 251

¹⁹ *Gourna: A tale of two villages*, 1969; *Architecture for the poor*, 1973; *Natural energy and vernacular architecture*, 1986.

Nel 1941, scoprì che i muratori del villaggio nubiano di Abu al Rich costruivano volte con mattoni di terra senza centine adoperando una tecnica molto antica adoperata per migliaia di anni per costruire case, granai e palazzi reali: comincia ad usare questa tecnica nel progetto per il Rural Hospital.

Studiando le pitture parietali egiziane trovò lo strumento adoperato dagli antichi costruttori per costruire le cupole e nella Nubia contemporanea cercò i manovali che ne avevano conservato la memoria: per costruire le cupole adoperavano delle funi fissate a terra al centro dello spazio da coprire e con l'altro capo una barra in legno ortogonale alla corda stessa, barra che funziona da guida per il corretto posizionamento dei mattoni. Dall'esperienza e dai grafici antichi, Fathy ridisegna il "Compasso" in legno.

Questo strumento, adatto a costruire cupole senza centina, è stato perfezionato da un architetto napoletano, Fabrizio Càrola, che lavorando nel continente africano, e dovendosi confrontare con popolazioni con scarse risorse economiche e con la carenza di legno, sceglie come materia prima la terra, tanto per le pareti portanti, quanto per le coperture. Interessanti e di notevole pregio architettonico sono le sue architetture (fig. 35-36) la cui forma, materica e geometrica, nasce sempre dal soddisfacimento delle esigenze specifiche del luogo e del tempo. Partendo da esigenze ed approcci completamente diversi, Càrola come Fathy sceglie la terra come materiale "appropriato".



Fig. 35 Ospedale di Koedi, Mauritania (on line: <http://archit.it/carola>)



Fig. 36 Mercato per le erbe mediche nel quartiere Medine a Bamaco in Mali (1995). Vista esterna del mercato (on line: <http://archit.it/carola>).

Càrola non è l'unico architetto italiano che si è interessato ed ha costruito con la terra cruda. In Sardegna c'è un folto gruppo di professionisti che, oltre ad occuparsi del restauro e della conservazione del patrimonio storico esistente, conduce anche studi per il migliore utilizzo dei ladiri nelle architetture contemporanee: la casa per anziani di Quartiere S. Elena è la concretizzazione di questi studi. Il panorama contemporaneo del mondo dell'architettura è pieno di termini che continuano a sperimentare l'espressività e la capacità dei materiali in terra, inventando e rielaborando tecniche costruttive tradizionali e non, cercando di sfruttare le notevoli caratteristiche di isolamento termico e di sostenibilità, e adoperandolo anche in combinazione con materiali contemporanei, come il calcestruzzo o l'acciaio: si pensi alle pareti di accumulo del calore che l'architetto tedesco Martin Rauch realizza utilizzando la tecnica del Pisè, da lui modificata per ottenere diverse policromie: all'impasto di terra sono aggiunti pigmenti naturali che colorano il getto, tutta la parete o ad evidenziare gli strati del getto.

Non è qui possibile illustrare tutti quelli che sono i progetti e le architetture contemporanee in terra cruda. Ma è sicuramente importante sottolineare il valore di sostenibilità che questo materiale ha assunto in tali opere.

La terra cruda è "sostenibile" a 360 gradi:

- è un materiale naturale per la cui costruzione e lavorazione c'è un basso consumo di energia;
- il suo impasto è realizzato utilizzando materiali naturali e pertanto il dismessimento delle costruzioni non genera rifiuti che necessitano di particolari discariche, come invece accade con materiali "moderni"
- le pareti in Terra presentano un elevato coefficiente di isolamento termico e le abitazioni hanno un coefficiente igrometrico ottimale tant'è che le case in terra, anche le più umili, offrono un ottimo microclima interno riuscendo a mantenere la temperatura interna pressoché costante (intorno ai 18-20° C) tra inverno ed estate e tra notte e giorno;

- questo materiale è, come ampiamente illustrato, presente in diverse culture, e quindi il suo utilizzo non viola la identità locale, anzi se ne può arricchire e dedurre gli elementi architettonici costituenti,
- è un materiale reperibile ovunque e come tale accessibile, dal punto di vista economico, anche da popolazioni che non hanno elevata disponibilità economica.

La sostenibilità, nel senso su esposto, è l'aspetto di maggiore modernità di questo materiale.

1.5. La Terra e i terremoti.

Si è già visto come le aree di maggiore diffusione del crudo siano caratterizzate da un'alta sismicità.

«Queste aree, infatti, sono comprese nei due “circoli semplici” più importanti: quello circumpacifico o andino-giapponese, nel quale si registra il 38% dei movimenti tellurici dell'intero globo, e quello dei mediterranei (europeo, asiatico e americano) o alpino-himalayano, che ne registra il 54%.»

Galdieri E., 1982, p233

Dall'esito dei terremoti che si sono abbattuti sulle costruzioni in terra negli ultimi tre secoli, documentati dai diari dei viaggiatori del passato, è possibile affermare che le costruzioni in terra, rispetto ad un sisma, non si comportano in modo peggiore di quelle realizzate con gli altri materiali tradizionali e questo sia per la notevole duttilità del materiale che per gli accorgimenti tecnici adoperati. Eppure nell'idea comune la terra continua ad essere vista come un materiale estremamente vulnerabile, non smette di ricordare i castelli di sabbia costruiti in riva al mare pronti ad esser cancellati dalla prima ondata.

Diverse sono state le sperimentazioni tese a valutare le prestazioni meccaniche delle pareti in terra da quelle svolte negli anni '70 in Iran da alcune università locali in collaborazione con istituti di Geofisica eu-

ropei²⁰ a quelle negli anni eseguite da CTRAT-erre, ai test di modelli in scala su tavola vibrante eseguiti alla PUCP (Pontificia Universidad Católica Do Perù) o al Getty Conservation Institute.

«I diversi rapporti tecnici, sostenuti ovviamente da precisi dati statistici, sono concordi nell'ammettere che già a poca distanza dalla zona megasisimica, gli effetti distruttivi sulle strutture in crudo si attenuano rapidamente. Il fatto indica senza ombra di dubbio una straordinaria capacità di assorbimento delle scosse sia sussultorie che ondulatorie, certamente maggiore che in analoghi edifici più rigidi e meglio costruiti».

Galdieri E.,1982, p234

La presenza, ancora oggi, di edifici in terra risalente a milioni di anni fa, come le antiche Ziggurat o i granai di Ramesse II a Tebe, non fanno altro che confortare questa tesi. Le più antiche costruzioni in terra, le Ziggurat tanto medio orientali che sudamericane sono essenzialmente delle masse inerti di terra con pareti rastremate verso l'alto. In queste costruzioni mastodontiche, dalla grande inerzia sismica, erano sempre presenti dei collegamenti orizzontali integrati da pilastri lignei, sicuramente di dimensioni ridotte rispetto alla massa muraria. A testimonianza di ciò ci sono i resti della piramide di Agar Quf, a circa 30 km da Bagdad, risalente al XV sec a.C. con il nucleo centrale costituito da adobes. Qui è rilevabile la presenza di precisi accorgimenti antisismici: in corrispondenza di ognuno dei tre gradoni sono presenti dei ricorsi di stuoie di paglia che attraversano tutta la costruzione in terra diminuendo dal basso verso l'alto, con il ridursi della massa muraria, intervallati da filari di corde vegetali intrecciate che fungono da tiranti. Inoltre, all'interno della costruzione, sono stati rilevati dei cunicoli che attraversano tutta la struttura da una faccia all'altra e che hanno la duplice funzione di areare e drenare le murature.

Un altro esempio significativo di costruzione antisismica sono le mura in adobe preincaiche del Perù: sembra che i costruttori antichi sapessero ben proporzionare lo spessore, l'altezza e le fondazioni di queste co-

²⁰ Si sono qui testate pareti in pisè e in adobes allo scopo di valutare il comportamento al sisma di questi due tipi di costruzioni e di escogitare degli appropriati mezzi di consolidamento da utilizzare nell'edilizia corrente.

struzioni ed addirittura calcolare peso e resistenza dei mattoni in rapporto alle dimensioni.

«Inoltre essi evitavano di saldare l'uno all'altro i vari ricorsi, lasciando al muro la più ampia elasticità e la più completa libertà di dilatazione, pur ricorrendo all'uso di canne di bambù – flessibile ma resistente – annegate verticalmente all'interno delle murature.»

Galdieri E., 1982, p238

Tra leggenda e realtà è la notizia che il palazzo di Puruchucu, presso Lima, sia stato costruito su di un cuscinetto di batuffoli di cotone alto un metro che funge da vero e proprio dissipatore sismico.

Per quanto riguarda invece le costruzioni “leggere”, qui le masse in gioco sono sicuramente minori, ma anche le altezze; inoltre molto spesso all'interno delle murature ed in punti strategici sono annegati dei legni, particolarmente elastici, che favoriscono l'assorbimento delle scosse e contribuiscono alla stabilità della costruzione; la stessa forma delle volte presenti nella tradizione costruttiva è tale da migliorare le prestazioni della struttura (Appendice: volte e cupole nubiane).

Il continuo misconoscimento della terra ha fatto sì che le popolazioni dimenticassero quelle che sono le regole della buona pratica costruttiva, cosicché oggi, sempre più spesso, le nuove case in terra non sono capaci di resistere ai terremoti che causano, al loro arrivo, la perdita di numerose vite umane. Si è sentita così la necessità di istruire di nuovo i popoli che ancora oggi vivono queste costruzioni sperimentando nuovi accorgimenti e diffondendoli poi tra di essi.

Tra le conseguenze della perdita del know-how c'è anche l'incapacità di intervenire in maniera appropriata sulle costruzioni esistenti e soprattutto di valutarne la effettiva capacità di affrontare un sisma. È in quest'ottica che nei capitoli successivi si affronterà lo studio delle costruzioni in terra: dall'analisi delle caratteristiche dei singoli componenti e dalla valutazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali si passerà allo studio dei meccanismi di collasso delle costruzioni in terra e alla proposta di un metodo per la valutazione della loro vulnerabilità sismica.

Cap. 2. Caratteristiche fisico-chimiche dei materiali

2.1. La qualità dell'impasto

L'uso della terra come materiale da costruzione ha fatto confrontare l'uomo con diversi tipi di suolo ed in funzione di questo e degli inerti disponibili in sito, si sono inventate le diverse tecniche di costruzione. La componente principale dell'impasto rimane sempre la terra, molto spesso chiamata, impropriamente, argilla, proprio per la sua alta componente di tale natura.

2.1.a. L'argilla

L'argilla è generalmente definita una "terra pesante" per la sua alta capacità di assorbimento di acqua, che ne può anche raddoppiare il peso. Per la sua analisi si deve tener conto tanto della composizione chimica e mineralogica che della granulometria, al fine di valutare la presenza di particolari cristalli. Per una granulometria al di sotto dei 2mm, è generalmente accettata la seguente classificazione:

- 0,2 – 2mm: sabbia grossa
- 0,02 – 0,2mm: sabbia fine
- 0,002 – 0,02mm (20 - 2 μ): limo
- < 0,002mm (2 μ): argilla

La terra utilizzata nelle costruzioni è un giusto mix di queste componenti, più le parti grosse che fungono da inerti. Le argille sono dei silicati, ed in particolare dei fillosilicati, caratterizzati da una struttura prevalentemente piatta. I minerali costituenti le argille sono definiti minerali argillosi e dal punto di vista mineralogico sono anisotropi con molecole che hanno una dimensione predominante sulle altre. Se queste si compattano tendono ad ordinarsi e quindi tendono all'entropia, ma senza soluzione di continuità: tra di esse si inseriscono i cationi (ioni positivi); a ciò è dovuta la capacità delle molecole di trasportare cariche elettriche. I minerali argillosi sono classificati in quattro gruppi principali, in base alla struttura cristallografica:

1. a due strati T-O (tetraedrico- diottaedrico)
2. a tre strati T-O-T (tetraedrico- diottaedrico- tetraedrico)
3. a quattro strati T-O-T-O (tetraedrico- diottaedrico- tetraedrico- triottaedrico)

4. a strati misti

Questi ultimi sono minerali costituiti da combinazione degli strati dei gruppi precedenti e sono i minerali più diffusi nelle rocce sedimentarie e nei terreni e vengono denominati in base ai gruppi costituenti: abbiamo le illiti-montmorilloniti, le coalimiti-montmorilloniti, gli illiti-cloriti-montmorilloniti, le cloriti-vermiculiti.

La caolinite, di formula chimica $(Al)_2Si_2O_5(OH)_4$ appartiene al primo gruppo (T-O) ed è di genesi idrotermale o per alterazione di feldspati in ambiente acido. la montmorillonite appartiene invece al 2° gruppo (T-O-T) ed è di formula chimica $(Na,Ca)_{0,33}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2H_2O$ e si forma in rocce a basso contenuto di silicio per alterazione di feldspati. A questo gruppo appartiene anche l'illite. Le cloriti appartengono invece al 4° gruppo e sono minerali magnesiaco-ferrosi di origine metamorfica. In genere le argille adoperate nelle costruzioni in terra appartengono a quest'ultimo gruppo.

I cristalli di argilla sono dotati di una notevole plasticità e questo perché le cariche negative di silicio attraggono il sodio che a sua volta si lega all'acqua che si stabilizza tra una parte e l'altra della molecola. L'acqua, introducendosi all'interno della struttura molecolare, funge da cuscinetto di scorrimento e permette alla molecola di deformarsi e scollarsi. Nel ciclo di umidificazione e asciugatura, si ha prima una dilatazione e poi una contrazione. L'argilla, in quanto materiale plastico, ha il grande difetto di dissolversi completamente in acqua²¹.

Essendo per sua natura così vario, un terreno può risultare di difficile identificazione e, per il suo utilizzo nelle costruzioni, questo deve avere un certo grado di precisione. Per l'utilizzo in costruzioni semplici, test basati sull'esperienza²², se tra di loro coerenti, possono essere sufficienti; in caso contrario, o per strutture più impegnative, sono necessari test di laboratorio più precisi. In ogni caso le fasi nell'identificazione e classificazione di un terreno sono tre:

- identificazione delle caratteristiche e delle proprietà di base dei componenti della terra che ne influenzano il comportamento meccanico

²¹ Palma Dias, G. J., 1993, A terra crua como material de construção, in Terra '93. 7ª Conferencia International sobre e estrudo e conservacao da arquitectura de terra, Lisboa, Ed DGEMN.

²² In appendice 6 si riportano i procedimenti per l'esecuzione dei test preliminari.

- stesura di una relazione in cui si descrivono le caratteristiche e le proprietà di base del suolo identificate attraverso le analisi preliminari
- se l'analisi del terreno non permette una classificazione abbastanza precisa, si procede con le analisi di laboratorio.²³

Valutare il tipo e le quantità di argilla presenti nella terra è necessario per comprendere se e come la si può adoperare nella costruzione. Questa caratteristica influenza il comportamento globale della struttura: la presenza dell'argilla garantisce la coesione tra le parti del conglomerato finale (terra, acqua ed inerti), la lavorabilità dell'impasto, la resistenza a compressione e la durabilità del manufatto. Di contro una quantità eccessiva ne esaspera il ritiro ed i conseguenti fenomeni di microfessurazione. In generale, si può affermare che un suolo adatto ad essere utilizzato in edilizia contiene una percentuale di argilla variabile tra il 15 ed il 30%. In funzione della quantità di argilla, inclusa in questo range, e dell'assortimento gralunometrico si sceglie poi la tecnica di costruzione che meglio si confà alla materia prima disponibile.

Alla terra si aggiungono, al fine di migliorare le prestazioni dell'impasto e di correggerne la composizione altri materiali, inerti e non.

2.1.b. *Gli inerti*

L'impasto di terra, se costituito solo da terra ed acqua, presenta alcune debolezze:

- non è capace di sopportare alcuna sollecitazione di trazione
- è facilmente attaccabile dall'acqua
- nel ritirarsi si fessura, e in maniera maggiore all'aumentare della percentuale di argilla presente nel suolo di origine.

L'esperienza costruttiva maturata in millenni dell'uso di questo materiale, usa aggiungere alla mescola di base altri elementi, gli inerti, generalmente di origine vegetale e/o animale.

Sicuramente l'inerte più diffuso è la paglia, in genere di orzo perché tubolare. Questo materiale si aggiunge all'impasto dopo averlo essiccato ed accertandosi della assenza di muffa. Allo stato umido la paglia assorbe acqua che poi, con l'essiccazione del composto, rilascia lenta-

²³ Guillard H., 1989, op. cit.

mente: è da preferirsi la paglia tubolare perché funziona proprio da riserva d'acqua che rilascia progressivamente permettendo alla terra di essiccarsi più lentamente e quindi affievolendo il fenomeno di fessurazione dovuto al ritiro. Inoltre, la paglia, resistente a trazione lungo le fibre, disposta in maniera disordinata all'interno dell'impasto gli conferisce una certa resistenza a trazione e una maggiore capacità deformativi e quindi duttilità.

Per aumentare la resistenza all'acqua, in molte culture, all'impasto si aggiunge sterco animale la cui presenza genera la formazione di una colla tra il complesso organico e quello inorganico. Allo stesso scopo sono poi utilizzati gli oli vegetali (olio di oliva) o il succo delle foglie di fico d'india o, in Giappone, masse di alghe putrefatte.

Ancora, in presenza di terre molto grasse, in alcune culture si aggiunge della sabbia, in quantità proporzionale alla percentuale di argilla presente nella terra base.

Quelli su esposti sono espedienti della tradizione costruttiva, integrati nelle tecniche costruttive. Oggi, l'esigenza di adeguare questi materiali all'utilizzo nelle costruzioni contemporanee per cui è richiesto il rispetto degli standard attuali di sicurezza, ha indotto i ricercatori a sperimentare ed "inventare" nuove mescole, spesso ottenute per aggiunta di altri materiali o anche elementi ottenuti per "precompressione" che presentano un notevole incremento delle capacità portanti dei parametri in terra.

2.1.c. Additivi e tecniche di stabilizzazione

Le prestazioni dei manufatti in terra che utilizzano il terreno locale possono essere migliorate attraverso l'utilizzo di opportune forme di stabilizzazione, che può essere ottenuta in diversi modi:

- a. miglioramento per densificazione attraverso la compattazione manuale o meccanica che produce la riduzione della porosità della terra;
- b. correzione della granulometria attraverso l'aggiunta di altra terra contenente gli elementi mancanti;
- c. stabilizzazione chimico-fisica, attraverso materiali quali la calce, il cemento o il bitume che reagiscono chimicamente con l'argilla contenuta nella terra d'impasto; lo stesso risultato si può ottenere aggiungendo materiali naturali quali il caucciù naturale, la caseina, la gomma arabica, gli oli di cotone, il cocco e il lino, il copal e l'olio

di sisal. Ancora, tra i prodotti chimici vanno ricordate le resine sintetiche e i silicati²⁴.

Attraverso la compattazione meccanica sono state rielaborate le tecniche tradizionali del Pisè e dell'Adobe. Nel primo caso, la terra, all'interno dei casseri, è compattata attraverso dei compattatori meccanici con una punta piatta e liscia di diametro variabile tra i 6 e i 12 m, precedentemente vibrata sempre meccanicamente. Questo processo assicura la fuoriuscita di tutta l'acqua superflua e la riduzione dei vuoti, con una conseguente maggiore omogeneità del parametro, riduzione della microfessurazione dovuta al ritiro e maggiore omogeneità tra strati successivi. Si ottiene così un netto incremento delle capacità portanti della muratura grazie al quale si possono ridurre significativamente gli spessori delle pareti. Molto spesso alla compattazione meccanica si affiancano anche altri metodi di stabilizzazione che vanno dalla correzione della granulometria (all'interno dell'impasto si includono anche inerti quali sabbie e pietrisco per un diametro fino ad un massimo di 5 cm e comunque inferiore al 10% dello spessore) alla aggiunta di calce o calcestruzzo (in percentuale massima del 5% ed in questo caso la terra va setacciata in modo da eliminare le parti grosse). Con l'utilizzo di questa tecnica è possibile realizzare anche pannelli fuori opera: predisposte le fondazioni, all'interno di appositi casseri dotati di ferri per il sollevamento, si realizzano delle pareti che vengono posate in opera su di un letto di malta a base di terra o calce preventivamente steso. I casseri sono dotati, ai lati, di appositi sagomatori a maschio e femmina e, partendo dagli angolari costruiti con casseforme speciali, i singoli pannelli sono montati progressivamente con l'interposizione di malta. In alcuni casi all'interno degli stessi è alloggiata un'armatura verticale: in legno o anche in acciaio.

Ancora per compressione meccanica sono ottenuti i blocchi di adobe stabilizzato. Attraverso presse manuali o meccaniche è possibile ottenere degli elementi base pressati e stabilizzati. In tal senso si è mosso il Professore Roberto Mattone del politecnico di Torino, utilizzando una pressa manuale, la GEO 50 della ALTECH, capace di conferire uno sforzo di compattazione di circa 2MPa. Di questi elementi è stata determinata la resistenza a compressione mediante prove di laboratorio.

²⁴ Bertagnin M., 1999, op. cit.

«I provini (5 per ogni tipo di prova) sono stati stabilizzati con diverse percentuali di cemento (0%-4%-7%-10%) in accordo con quanto definito dalla Commissione TC EBM (Earth as Building Material) della RILEM».

Mattone R., 2003, pag. 71

L'esito delle prove è riassunto nella tabella seguente.

PROVA	CONFEZIONAMENT O PROVINO	ESITO PROVA			
		0%	4%	7%	10%
compressione σ (MPa)	2 blocchi sovrapposti con interposto un sottile strato di malta	2	2,2	3	4
flessione σ (MPa)	Un provino è stato condotto ad uno schema statico appoggiata- appoggiata e caricato al centro	0,55	0,7	1	1,2
trazione indotta σ (MPa)	Un mattone è stato caricato ortogonalmente ed è stata misurata la trazione in perpendicolare.	0,25	0,3	0,4	0,6

Tabella 1

La presa manuale è stata modificata per ottenere dei blocchi sagomati al fine di semplificare il processo costruttivo e migliorare la qualità globale della muratura. L'efficacia dei blocchi sagomati realizzati con la pressa modificata è stata verificata sottoponendo alcuni provini di muratura (90x90cm) a prove di compressione semplice, di compressione semplice e spinta laterale, di compressione diagonale.

Nelle ultime due prove la connessione meccanica tra i blocchi ha posto in evidenza un sostanziale miglioramento delle prestazioni all'aumentare della percentuale di cemento inclusa.

Questa tecnica è stata utilizzata per la prima volta nel 1994 nel nord-est del Brasile (Paraiba) per la ricostruzione della favela denominata Cuba de Baixo nella cittadina di Sapè.

Uno degli additivi, che forniscono una stabilizzazione chimica agli impasti di terra, utilizzato da più tempo è la calce.

«Principalmente in virtù della dimensione delle particelle del minerale di argilla del suolo e della sua struttura lamellare, i cationi (in modo particolare di Ca^{++} e di Mg^{++}), che fanno

parte della calce, provocano una saturazione dei minerali argillosi del suolo, aumentandone la stabilità».

Mendoça de Oliveira M., 2005 pag. 106

L'uso della calce come stabilizzante della terra è antichissimo, addirittura, secondo alcuni, la terra stabilizzata con calce sembra sia stata adoperata dai Romani (nella costruzione della via Appia) e nella costruzione di alcune parti della muraglia cinese.

«La divulgazione della pratica di stabilizzazione con calce fu più intensa con la comparsa della figura degli ingegneri militari e della nuova architettura fortificata, in virtù del fatto che la terra stabilizzata è una soluzione migliore per la realizzazione delle cortine, specialmente dei parapetti [...]. Il suolo-calce (solo-cal) e il suolo-cemento (solo-cimento) allargano la strada dell'impegno della terra nella costruzione, in virtù del fatto che aumenta significativamente la resistenza del materiale».

Mendoça de Oliveira M., 2005 pag. 107

Sempre nell'ottica di migliorare le prestazioni meccaniche degli adobe, ed in particolare aumentare la duttilità e la resistenza a trazione, sono state condotte nel mondo sperimentazioni su impasti a cui sono stati aggiunti materiali diversi caratterizzati dalla elevata deformabilità e resistenza a trazione.

In Turchia²⁵ sono stati sperimentati adobes che utilizzano come inerti fibre e fili di polistirene derivanti dalle industrie tessibili.

L'impasto base è costituito da: Argilla (50kg), Cemento (10kg), Pomice Basaltica (15kg), Calce (2kg), Gesso (3kg), Acqua (20kg)

Al fine di confrontare le diverse prestazioni, sono stati testati 3 tipi di provini (15x15x15 cm):

- 0,1 kg di fibre plastiche
- 2 kg di paglia
- 0,5 kg di fili di polistirene

I provini sono stati confezionati in casseri di acciaio in cui ad 1/3 e 2/3 dell'altezza sono stati interposti 3 tipi di sottili layer di reti in plastica, paglia e tessuto di polistirene.

²⁵ Binici H. et al., 2005, *Investigation of fibre reinforced mud bricks as a building material*, in *Construction and building materials* 19, (on line: <http://elsevier.com/locate/conbuildmat>)

Quindi per ogni impasto base sono stati ottenuti 3 tipi di provino.

		σ (N/mm ²)		
		7 gg	28 gg	96 gg
Fibre Plastiche	A1	2.03	5.00	6.01
	A2	2.04	4.09	6.05
	A3	2.07	5.06	7.01
Paglia	B1	1.06	3.08	5.00
	B2	1.07	4.01	5.03
	B3	2.00	4.08	5.08
Fili di Polistirene	C1	1.07	2.04	3.07
	C2	2.01	2.06	4.02
	C3	2.00	2.04	4.09

Tabella 2

Tenendo conto che la normativa turca richiede ai mattoni una resistenza minima 0,5-1 N/mm², con questa tecnica si ottiene un notevole incremento delle capacità resistenti. Inoltre la presenza delle fibre conferisce ai manufatti una maggiore duttilità il che li rende più idonei all' utilizzo in zona sismica.

In Brasile²⁶ invece è stato sperimentato un impasto che utilizza gli scarti della lavorazione della carta: ad una terra con proporzioni di 85% di sabbia e 15% di argilla si aggiungono materiali a base di cellulosa. Si sono realizzati degli adobe con percentuale variabile di cellulosa. I mattoni solo di terra (terra arenosa) presentano una maggiore difficoltà di lavorazione. Quelli con la presenza di residuo risultavano più "legati" e si ritiravano meno con l'essiccazione, estraendosi con più semplicità dalla forma senza sfaldare o rompere i bordi. Questi stabilizzanti naturali, come nel caso delle fibre vegetali, riducono significativamente, l'effetto del ritiro e, principalmente, la fessurazione. Principalmente, l'uso dei residui, aumenta la lavorabilità, la durabilità ed inoltre stabilizza l'impasto fungendo da legante. Inoltre dalle prove di laboratorio è risultato un incremento del 20% della resistenza a trazione.

²⁶ Gomes Battistelle R. A., Borges Faria O., 2005, *Aproveitamento do lodo residual do processo de fabricação de celulose e papel em tijolos de terra-crua*, in *Terra em seminario*, atti IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, III Seminário Architecture de Terra em Portugal, p. 236, Edizione ARGUMENTUM, Lisbona.

Interessante è poi la ricerca condotta da Venkatarama et all nel 1997-1998 in India²⁷. Si è sperimentato un metodo per la essiccazione dei mattoni che accelera la presa tra argilla e calce: in genere per stagionare i mattoni sono necessari circa 21 gg, con un processo di stagionatura in forno a vapore a 80-90 °C I tempi si riducono a 10 ore. Si sono testati provini con diverse proporzioni tra terra, sabbia e cenere e stabilizzati con calce e cemento. La terra utilizzata è ad alto contenuto argilloso (36% di argilla)

Provino n°	Parti in peso di:			Stabilizzanti (%vol)		Resistenza/Stagionatura			
	Terra	Sabbia	Cenere	Calce	Cemento	21gg	In forno	In forno più 1 anno	In forno più 2 anni
1	1	2.05	0	11	0	-	0,13958333	-	-
2	1	2.05	0.53	11	0	0,06111111	7,07	8,19	-
3	1	2.05	0	8	3	2,53	4,25	-	-
4	1	2.05	0.53	8	3	0,20833333	11,00	10,26	0,42569444
5	1	2.05	0.53	5	2	2,30	0,30277778	0,22916667	4,38
6	1	2.05	0.53	0	10	0,27083333	0,38472222	9,24	0,35763889

Tabella 3

Ma la ricerca non si è fermata al miglioramento delle prestazioni per le tecniche tradizionali, anzi molto spesso, attraverso la loro reinterpretazione, se ne sono inventate di nuove. È il caso questo della terra alleggerita, reinterpretazione del torchis con cui è possibile ottenere tanto pannelli prefabbricati molto leggeri di mattoni utilizzabili per la realizzazione di pareti di tamponamento e dall'elevato coefficiente di isolamento termico, ed anche dei mattoni estrusi ottenuti utilizzando terre molto grasse (circa 35% di argilla) con un processo analogo a quello per la produzione dei mattoni cotti. Questa tecnica è stata ampiamente utilizzata e sperimentata dal Prof. Gernot Minke.

Al fine di ottenere in autocostruzione pareti con maggiore resistenza è stata inventata una tecnica costruttiva che affianca ad una parete in terra (17 cm) due pareti in calcestruzzo (1,5 cm a parete). Questa tecnica è stata sperimentata da Acevedo et al²⁸ ed utilizzata in un programma di

²⁷ Venkatarama Reddy B. V., Lokras S. S., 1998, *Steam-cured stabilised soil blocks for masonry construction*, in *Energy and buildings* n° 29, p. 29.

²⁸ Acevedo J. D., Villarreal H. M., Trejo M. A., García P. C., 2005, *Sistema autoconstructivo muro de tierra-concreto, aplicado en la región sureste de coahuila: equidad de género*, in *Terra em seminário*, atti IV Seminário Ibero-Americano de Construção

autocostruzione in Messico. Per la costruzione di un setto murario il procedimento è il seguente:

- Preparazione della terra: selezione della terra privata delle pietre grosse e delle parti organiche
- Stabilizzazione della terra con calce in percentuale del 5% in peso
- Si lascia riposare la terra per 12h e si aggiunge la quantità di cemento necessario
- Si aggiunge l'acqua nella percentuale del 14% del peso e si mescola
- Si prepara il calcestruzzo con una resistenza $F^c=100 \text{ kg/m}^2$ per i pannelli
- Si passa alla realizzazione dei pannelli in cls che dovranno quindi essiccarsi
- Si smonta la cassaforma per la costruzione delle pareti
- Si versa la terra all'interno delle due pareti, per strati e comprimendola a mano a mano per livelli di circa 10 cm.

Per valutare le prestazioni del manufatto sono state condotte delle prove di laboratorio i cui esiti sono riportati in tabella per la cui realizzazione sono stati predisposti dei provini cilindrici del diametro di 10,2mm e provati al 28° giorno di stagionatura.

Resistenza a compressione del sistema terra-cemento				
		Cemento (percentuale in peso)		
		0%	3%	5%
Provini	Giorni	Resistenza(kg/m ²)		
Cilindri	0	1,65	0,68	1,79
	4	3,63	3,19	7,56
	7	3,39	4,79	10,16
	28	4,35	6,86	20,3
Pannello	14	19,99	25,06	-

Tabella 4

Il pannello testato era delle dimensioni di 20x20x41 cm.

com Terra, III Seminário Architecture de Terra em Portugal, p. 53, Edizione ARGUMENTUM.

2.2. Durabilità della terra

È questo uno dei problemi più importanti per chi ha intenzione di studiare, conservare o costruire in terra. Nonostante la presenza di edifici di milioni di anni che ci testimoniano ancora l'antica tradizione delle costruzioni in terra, lo stato di degrado in cui versano molti di essi, relativamente recenti, ed il completo dissolvimento di antichi siti del passato portano a chiedersi qual è la durata di questo materiale. Alla base di questo problema «sta un insieme di fattori eterogenei, il cui mutuo e variabile comporsi può determinare la rapida fine di un edificio o la sua incredibile sopravvivenza nei secoli» (Galdieri E. 1982 p. 231).

La durata e la manutenzione degli edifici in terra sono strettamente collegati tra di loro ed intimamente connessi alla corretta realizzazione del manufatto.

Le intemperie, in particolare l'azione dell'acqua piovana, del vento e la loro combinazione, sono la causa principale del degrado delle opere in terra e possono, in alcuni casi, provocarne il collasso parziale o totale. La mancanza di adeguate conoscenze tecnologiche e la riproposizione analogica di soluzioni adeguate per altri materiali su pareti in terra molto spesso finiscono per favorirne il degrado.

Le cause che generano il degrado delle suddette costruzioni sono diverse e possono nascere da:

- Difetti costruttivi
- Infiltrazioni di umidità
- Cicli di gelo e disgelo
- Attacco dell'umidità in presenza di terre contenenti humus
- Attacchi da parte di organismi vegetali e/o animali
- Cattiva o mancata manutenzione
- Degrado e/o cattiva esecuzione e/o inadeguatezza dell'intonaco.

La durata degli elementi costruttivi e delle finiture degli edifici in terra dipende sia da fattori estrinseci che intrinseci. Gli agenti esterni che comportano il degrado degli elementi possono essere di natura fisica (agenti atmosferici), chimica ed organica. Tra gli agenti atmosferici oltre al grave problema dell'acqua piovana che può generare l'insorgere di umidità per risalita capillare, infiltrazioni e dilavamento delle superfici, un altro fattore di degrado sono le variazioni di temperatura che,

soprattutto in inverno, con il passaggio dalla notte al giorno, possono creare problemi di gelività che causano il distacco di materiale per implosione del supporto. Ancora l'esposizione al sole ed al vento favorisce il fenomeno del ritiro; questo è un problema che riguarda soprattutto l'intonaco che nella prima asciugatura subisce un ritiro che, per aderenza con il supporto genera su di esso delle forze. Se questo è umido e la parete è soggetta a vento e sole quando la parte più superficiale, l'intonaco, si asciuga e ritira provoca dei danni alla muratura sottostante. Si stacca e si lesiona portando con se anche parti del paramento. Il combinarsi poi di diversi agenti atmosferici (pioggia, vento, grandine, ecc...) provocano l'erosione degli strati superficiali.

Tra i fattori estrinseci sono poi da annoverare gli agenti biologici: l'attacco da parte di muffe, licheni, vegetali o insetti quali le termiti provocano un graduale indebolimento delle strutture portanti. È questo un fenomeno che si è verificato nella cittadella di Arg-e-Bam dove la scarsa resistenza al sisma mostrata dalle strutture è da ascrivere parzialmente alla presenza di termiti all'interno delle murature. Le forme di degrado che si manifestano più di frequente sono:

- a. microfessurazione: si manifestano a seguito del ritiro plastico del rivestimento, sono poco profonde e con uno spessore inferiore ad un millimetro. Si manifestano prevalentemente sulle facciate esposte a nord nell'emisfero settentrionale, a sud in quello meridionale. La loro presenza è dovuta ai continui cicli di umidità ed essiccazione in concomitanza con una cattiva realizzazione dell'intonaco
- b. ruscellamento: sono dei solchi verticali prodotti dallo scorrimento dell'acqua piovana per inadeguatezza del coronamento o per discontinuità del rivestimento che provoca la penetrazione dell'acqua e la conseguente disgregazione del materiale di supporto
- c. fessurazione: fenditure lineari continue del rivestimento, generalmente vincolate a carenze di origine strutturale. Si producono per concentrazione dei carichi e possono essere verticali, orizzontali o inclinate con spessore variabile e superiore ad un millimetro
- d. dilatamento: questo tipo di degrado si manifesta nelle parti più esposte all'acqua della struttura: parti terminali dell'edificio, angolari, in prossimità di aperture ed alla ba-

se della costruzione in mancanza di basamento. Questo problema si accentua in presenza di finiture non appropriate ed in particolare con rivestimenti sintetici o non permeabili che, staccandosi per effetto dell'umidità interna del paramento, provocano il distacco parziale del materiale di supporto.²⁹

«Cause rilevanti del fenomeno di degrado possono essere attribuite a carenze progettuali e ad errate tecniche costruttive (...) o ad interventi manutentivi non corretti» (De Sivo M. 2001, p. 230).

Quindi per la durata degli edifici in terra è fondamentale una corretta realizzazione a cominciare, sicuramente, da “buoni stivali” ed un “buon cappello”, intendendo con ciò la realizzazione di una fondazione e di un basamento appropriato (in genere realizzati con materiali diversi), per ostacolare il fenomeno di risalita capillare dell'umidità, e di una copertura appropriata capace di proteggere le pareti verticali dall'attacco diretto dell'acqua piovana. Dal punto di vista della corretta realizzazione è poi fondamentale l'intonaco, che deve essere sufficientemente resistente all'erosione, non eccessivamente rigido, resistente all'acqua ma capace di far traspirare la parete al fine di evitare l'insorgere di condensa tra il supporto e lo strato di finitura o sulla parte interna della parete.

Per la opportuna realizzazione degli intonaci il mondo scientifico ha effettuato diverse ricerche che utilizzano additivi di varia natura.

In Turchia³⁰, al fine di aumentare la resistenza all'acqua delle costruzioni in terra, è stato sperimentato un intonaco pozzolanico costituito da: 3% di calce, 12% di cenere derivante dagli impianti di combustione del carbone ed 85% di polvere di mattoni cotti (i mattoni sono polverizzati meccanicamente). La calce spenta funge da legante rispetto alla

²⁹ Sosa M.E., Ferreyra I.C., 2005, *Degradación de las superficies de muros de adobes por acción de fenómenos climáticos*, in *Terra em seminário*, atti IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, III Seminário Architecture de Terra em Portugal, p. 281, Edizione ARGUMENTUM.

³⁰ Baradan B., 1993, *Preservation of adobe walls*, in *Tierra '93*, atti 7° Conferencia internacional sobre o estudo conservação ad arquitectura de terra, ed DGEMN, Lisboa.

cenere e, con l'acqua, l'impasto acquisisce proprietà pozzolaniche. Sono stati sperimentati quattro tipi di intonaco:

- S0 → con l'impasto su descritto
- S10 → con l'aggiunta di 10% di terreno locale
- S15 → 15% di terreno
- S20 → 20% di terreno

Per ogni intonaco sono stati testati 2 muretti (0,90 x 0,60 x 0,18 cm). I test sono consistiti nell'esposizione a pioggia simulata per quattro ore continue in cinque giorni.

Inoltre è stato testato anche un muretto intonacato solo con terra per il confronto.

Impasto	Periodo di simulazione (ore)	Danneggiamento
Solo terra	10	Severo
S0	20	Nessuno
S10	20	Leggero
S15	20	Moderato
S20	20	Moderato

Tabella 5

Sono stati, inoltre, testati dei cubetti di lato 50 mm a compressione; gli esiti dei test sono riassunti nella tabella seguente.

Impasto	Resistenza a compressione a secco (N/mm ²)		Resistenza a compressione bagnati (N/mm ²)	
	A 7 gg.	A 28 gg.	A 7 gg.	A 28 gg.
S0	4,2	8,3	3,9	8,2
S10	3,1	4,4	3,1	4
S15	2,1	3,4	1,8	3,3
S20	1,5	2,8	1,4	2,2

Tabella 6

Per la valutazione della resistenza a bagnato i provini sono stati immersi in acqua per quattro ore.

Un diverso tipo di stabilizzazione degli intonaci è ottenuto attraverso l'utilizzo di fibre di diversa natura da inserire all'interno dell'impasto. È questo il caso delle sperimentazioni condotte in Pensilvania da Guerrero de Luna³¹.

Tipi d'intonaco	Prove eseguite	Consolidanti			
		Privo di consolidante	Mucillagine di fico d'india	Acrilico	Etil-silicato
Argilla	resistenza all'abrasione	D	D	B	A
	aderenza con il supporto	A	A	A	A ⁺
	capacità di assorbimento per capillarità	A ⁺	A	C	B
	trasmissione di vapore	A ⁺	A ⁺	B	C
	resistenza all'acqua	D	C	D	A
Calce	resistenza all'abrasione	D	D	A	A
	aderenza con il supporto	B	C	A	A
	capacità di assorbimento per capillarità	A	A	D	B
	trasmissione di vapore	B	B	C	C
	resistenza all'acqua	A	A	A	A
Gesso	resistenza all'abrasione	D	C	A	A
	aderenza con il supporto	D	D	C	B
	capacità di assorbimento per capillarità	A	A	D	C
	trasmissione di vapore	A	A	B	B
	resistenza all'acqua	C	C	A ⁺	A ⁺
Argilla e Calce	resistenza all'abrasione	D	C	B	A
	aderenza con il supporto	C	B	B	A
	capacità di assorbimento per capillarità	B	C	E	C
	trasmissione di vapore	B	B	C	D
	resistenza all'acqua	A	A	A	A ⁺
Gesso e Calce	resistenza all'abrasione	D	D	B	B
	aderenza con il supporto	C	D	C	B
	capacità di assorbimento per capillarità	A	A	D	A
	trasmissione di vapore	B	B	B	C
	resistenza all'acqua	B	C	A	A

Tabella 7

³¹ Beas Guerrero de Luna M. I., 1993, *Consolidation of traditional plasters: a laboratory research*, in *Tierra '93*, atti 7° Conferencia internacional sobre o estudo conservação ad arquitectura de terra, ed DGEMN, Lisboa, p. 410.

Sono testati, su mattoni di adobe di diverse dimensioni, cinque tipi d'intonaco additivati con tre diverse sostanze: mucillagine di fico d'india, una sostanza acrilica ed una a base di etil-silicato. Tutti gli intonaci sono stati testati per valutare:

1. resistenza all'abrasione: il coefficiente relativo è stato calcolato in termini di materiale perso in un minuto di test
2. aderenza con il supporto: i provini sono stati sottoposti a taglio ed è stata calcolata la resistenza in termini di F su unità di superficie
3. capacità di assorbimento per capillarità: misura la quantità di acqua assorbita. È stato adoperato un tubo RILEM per un'ora pieno d'acqua
4. trasmissione di vapore: i test sono durati 28 gg. e si è misurato il passaggio di vapore attraverso un diametro di $\frac{3}{4}$ "
5. resistenza all'acqua: i provini sono stati sottoposti alla caduta di una goccia per un certo periodo di tempo (tabella 7).

Dalle prove eseguite si è potuto asserire che:

- l'impasto di argilla su mattoni argillosi è quello che, prima del consolidamento si è comportato meglio
- l'impasto di gesso e calce è quello che ha avuto le peggiori performance prima del consolidamento
- i diversi consolidanti reagiscono in maniera diversa a seconda degli intonaci
- la mucillagine non cambia molto il comportamento dei supporti
- l'acrilico (acryloid B-67) muta notevolmente la capillarità e la trasmissione di vapore, impermeabilizzando il supporto, inoltre su intonaci argillosi procura fessurazioni
- "Conservare OH", l'additivo a base di Etil-silicato, è il trattamento che evidenzia la più ampia riduzione nella trasmissione di vapore (43-22%) mentre i test di capillarità variano da supporto a supporto. Inoltre la sua applicazione comporta un incremento del peso di 7,8% e, poiché il suo utilizzo non conferisce proprietà collanti, l'aggiunta di peso può accelerare il collasso d'intonaci già parzialmente staccati.

Le diverse ricerche svolte hanno evidenziato la possibilità di migliorare la durabilità degli edifici in terra anche utilizzando accorgimenti ed additivi di basso costo e di origine naturale. In un intervento di consolidamento e restauro, quindi, l'utilizzo di un intonaco appropriato, deve essere senz'altro un punto cardine del progetto, sia per la conservazione dell'aspetto della costruzione che per evitare danni alle strutture.

2.3. Comportamento meccanico

La caratterizzazione meccanica dei materiali in terra è legata a talmente tante variabili che risulta quasi impossibile stabilire un valore di riferimento universalmente valido. Innanzitutto il comportamento strutturale del manufatto è fortemente influenzato dalla natura della terra e soprattutto dalla quantità e qualità dell'argilla in essa contenuta: l'argilla funge da legante, dona coesione all'impasto, ne favorisce l'amalgamazione e la continuità, ma, contemporaneamente un eccessivo tenore di argilla genera fessurazioni in fase di essiccazione e quindi fa calare le prestazioni del prodotto finale. Inoltre la presenza o meno dei diversi inerti e l'assortimento granulometrico provocano variazioni sensibili sui valori significativi delle caratteristiche meccaniche, quali la resistenza, il modulo elastico e la duttilità. A ciò si aggiunge la tecnica costruttiva: a seconda che siano pareti in adobe o in pisè o in bouge il comportamento globale della struttura è diverso, influenzato proprio dall'interconnessione tra le varie parti che costituiscono il pannello e dalla sua omogeneità. Le ricerche svolte testimoniano però che è possibile raggiungere un buon livello di approssimazione sia nella determinazione dei valori da assegnare alle caratteristiche meccaniche che nella definizione qualitativa del comportamento meccanico dei materiali. In tal senso è molto interessante la ricerca condotta dalla Professoressa Silvia Briccoli Bati presso l'Università di Firenze.

L'indagine era volta a determinare il comportamento meccanico delle costruzioni in terra presenti in tre aree di grande diffusione della terra in Italia: la Sardegna con i ladri, il Piemonte con il pisè e la Calabria con le brestare. I provini sono stati in parte realizzati con materiali prelevati dalle costruzioni esistenti ed in parte ex-novo utilizzando terra locale e riproducendo lo stesso impasto. In mancanza di una normativa

specifica, le prove sono state eseguite seguendo i dettami per gli altri materiali da costruzione. Sono state eseguite prove di trazione e compressione monoassiale monotone e cicliche finalizzate alla individuazione delle caratteristiche meccaniche utili alla valutazione delle capacità portanti delle strutture in terra. Innanzitutto si sono determinati i valori di resistenza, a trazione e a compressione ed i corrispondenti moduli elastici. I diagrammi carico-spostamento ($P-\delta$) registrati durante le prove presentano caratteristiche comuni che sono state rappresentate in un diagramma tipo (fig. 37).

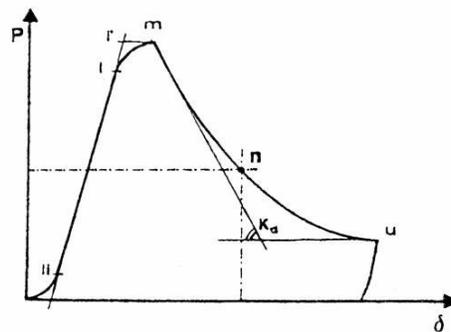


Fig. 37 Schematizzazione di diagramma carico-spostamento tipo (Briccoli Bati S.,2001)

I punti caratteristici sono:

- l_i = punto in cui inizia il tratto che, con buona approssimazione, può essere considerato lineare
- l = limite di linearità cui si attribuisce anche il significato di limite di elasticità ai fini del calcolo degli indici di duttilità
- l^1 = punto ottenuto per prolungamento della retta l_i-l^1 e l'orizzontale condotta dal punto di carico massimo; la sua ascissa rappresenta lo spostamento elastico a rottura.
- m = punto in cui il diagramma raggiunge la massima ordinata (carico di picco)
- n = è limite di assestamento e rappresenta il punto in cui il percorso di equilibrio post picco linearizzato si appiattisce dopo la prima caduta

- u = punto ultimo

In base a questi ultimi due punti sono state calcolate alcune grandezze derivate che rappresentano i parametri meccanici più significativi per descrivere il comportamento del materiale.

«Più precisamente sul percorso di equilibrio è possibile individuare un tratto iniziale non lineare dovuto probabilmente al modificarsi del contatto tra piatti e campione; ad esso segue un tratto che si può con buona approssimazione, considerare lineare e sul quale viene calcolata la rigidezza tangente.»

Briccoli Bati S., 2001 p. 146

Lo stato fessurativo finale è caratterizzato da fratture ad andamento parallelo alla direzione di carico, a testimonianza della pressoché inesistente resistenza a trazione del materiale e della sua conseguente incapacità di diffondere le tensioni all'interno del volume. Circostanza questa che si evidenzia con prove in cui la superficie caricata è ridotta rispetto alla dimensione globale della faccia del profilo: le lesioni, dovute alla differenza di stato di tensione e quindi di deformazione tra le due parti, si manifestano all'interfaccia tra la zona caricata e quella scarica. Questo fenomeno giustifica molte delle fratture che è possibile osservare nelle costruzioni in terra cruda o anche in muratura soprattutto in corrispondenza delle zone d'appoggio delle travi.

I valori di resistenza a compressione si sono attestati intorno ai 4-7 N/cm² ben al di sotto di quelli dei mattoni cotti (18-20 N/cm²), ma ciò corrisponde una maggiore duttilità, il che va a vantaggio di sicurezza nel caso di costruzioni in zona sismica. Nello stesso lavoro si è poi valutata l'influenza degli inerti e della paglia sulle caratteristiche meccaniche. Sono state confezionate tre serie di provini con impasti diversi:

1. terra, inerti e paglia
2. terra ed inerti
3. solo terra vagliata (con granulometria tutta al di sotto di un certo diametro)

L'impasto che fornisce il massimo valore del parametro resistenza a trazione è quello del tipo 3 e l'ultimo quello del tipo 1, che però ha mostrato un percorso di equilibrio post picco meno ripido e quindi una maggiore duttilità. Esito analogo ha dato la prova a compressione. Quindi, l'aggiunta della paglia nell'impasto ha due valenze fondamentali: la prima è quella di moderare il ritiro che genera, come visto, una

maggior attaccabilità della muratura da parte degli agenti atmosferici e la seconda, ma non meno importante, di conferire duttilità alla costruzione, fattore che era, sebbene inconsciamente, tenuto bene in conto dai costruttori antichi che dimensionavano e realizzavano le loro costruzioni solo in funzione delle manifestazioni e quindi degli spostamenti delle strutture (fig. 38).

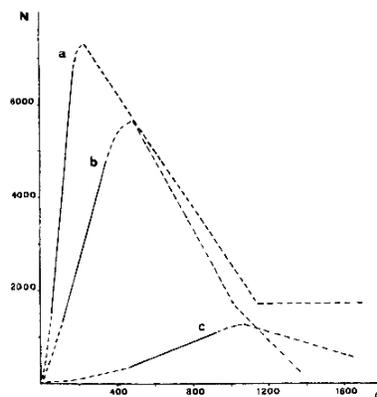


Fig. 38 Diagramma medio carico-spostamento di prove di compressione monoassiale monotone effettuate su provini di mattone cotto formato per trafilatura (a), mattone cotto formato per pressatura (b) e mattone crudo formato per pressatura(c) (Briccoli Bati S., 2001)

Con le prove di carico ciclico, analogamente a quanto accade con gli altri materiali da costruzione, la crisi si registra per valori più bassi di quelli della prova monotona con un progressivo irrigidimento dovuto alla compattazione che si verifica a livello della struttura interna del materiale, fenomeno che se da un lato genera deformazioni plastiche, dall'altro fa aumentare la rigidità.

Una caratterizzazione meccanica delle diverse tecniche costruttive è stata eseguita CRAT-erre AEG e pubblicata in Houben (1989). Si riporta di seguito una tabella sintetica.

Caratteristiche	blocchi compressi		adobe		pisè		blocchi estrusi	unità di misura
	Crudo	Stab	Crudo	Stab	Crudo	Stab		
Resistenza a compressione a secco a 28 gg.	<2	05-dic	<2	02-mag	<2	02-mag	05-dic	N/cm ²
Resistenza a compressione umida a 28 gg. (immersione per 24 ore)	0-0,5	>2	0-0,5	-	0-0,5	>2		N/cm ²
Resistenza a trazione a secco a 28 gg. (prova brasiliana)		01-feb				01-feb		N/cm ²
Resistenza a trazione a secco a 28 gg. (prova su barretta)	0,5-1				0,5-1			N/cm ²
Resistenza a flessione a secco a 28 gg.	0,5-1				0,5-1			N/cm ²
Resistenza a taglio a secco a 28 gg.	<0,5				<0,5			N/cm ²
Coefficiente di Poisson		0,15-0,35		0,15-0,35		0,15-0,35		
Modulo di Young		0,7-7		0,7-7		0,7-7		KN/cm ²
Massa volumetrica apparente	1700-2200	>2200	1200-1700	1200-1700	1700-2200	1700-1200	<1200	Kg/m ³
Resistenza all'impatto tangenziale di un corpo molle (altezza di partenza di un sacco di sabbia di 27 kg sospeso verticalmente sul muro)		02-mar	02-mar	01-feb	02-mar	01-feb		M
Resistenza all'instabilità per carico eccentrico (coefficiente di riduzione per pareti con snellezza da 7 a 8 e spessore di 30 cm)		>50	0,4-0,5	0,2-0,3	0,3-0,4	>0,5		
Resistenza a flessione		0,00005 0,0006	0,00005 0,0006	0,00005 0,0006	0,00005 0,0006	0,00005 0,0006		N/cm ²

Tabella 8

I valori su riportati sono riconosciuti a livello internazionale e sono stati anche utilizzati per la stesura delle norme tecniche di diversi paesi.

Cap. 3. Conservazione e consolidamento di costruzioni in terra

3.1. Costruzioni “a regola d’arte” per resistere ai terremoti

La parziale coincidenza delle aree di diffusione della terra con quelle a più elevato rischio sismico, pone il problema della valutazione della vulnerabilità sismica di questo tipo di costruzioni in primo piano, soprattutto in vista del loro comportamento meccanico e della sempre più alta mortalità che si registra in siti costruiti in terra in seguito ai terremoti.

Ma se questo materiale è così pericoloso perché per millenni si è continuato ad usarlo anche in aree dalla elevata pericolosità? Può essere che le ragioni fossero solo di reperibilità ed economicità del materiale?

Diverse ricerche condotte in tutto il mondo dimostrano che il comportamento delle costruzioni storiche in terra cruda nei confronti degli eventi tellurici non è discosto da quello delle altre costruzioni tradizionali, mentre per le costruzioni più recenti si ha un'impennata della vulnerabilità. Ciò è strettamente connesso alla perdita di conoscenze, memorie e competenze che garantivano alle costruzioni di essere realizzate utilizzando accorgimenti tecnologici appropriati: sempre più spesso nei paesi in via di sviluppo si vuole costruire con la terra case che si avvicinano, per estetica, a quelle realizzate in c.a., con la comparsa di pilastri, l'aumento dei piani e la contemporanea scomparsa dei cordoli di collegamento, dei basamenti in pietra, e di tutti quegli accorgimenti che, sviluppatisi grazie alle esperienze del passato, migliorano il comportamento antisismico degli edifici.

Eppure, soprattutto in Sud America, le popolazioni hanno una certa confidenza e con i terremoti e con le costruzioni in terra.

A Mendoza, in Argentina, l'edilizia storica è realizzata totalmente in terra, ma nella tradizione costruttiva locale, coloniale e post coloniale, non erano presenti grandi accorgimenti per fronteggiare i terremoti, sebbene la regione sia caratterizzata da un'alta sismicità: le abitazioni, in genere ad un piano, erano costruite sul tipo della casa romana o pompeiana, con un susseguirsi di corti interne in numero variabile, a seconda dell'importanza della casa, con diverse gallerie e con corpi di

fabbrica aggregati ad “L”, “U”, “T” e “C”. Le coperture, a causa della mancanza di legno di qualità adeguata, erano costituite o da volte (in muratura o con armatura in legno), oppure da tetti a capanna notevolmente inclinati, e quindi, in entrambi i casi, da strutture spingenti. Nel 1850, quando la memoria del precedente grosso sisma era andata persa, la città fu colpita da un forte terremoto che la distrusse quasi completamente provocando la perdita di tantissime vite umane.

La ricostruzione fu operata soprattutto importando l’esperienza dei paesi vicini, migliorando le prestazioni dei manufatti nei confronti dei terremoti. Fu posta maggiore cura nella preparazione dei materiali e nella scelta della materia prima, donando maggiore omogeneità all’impasto. All’interno della muratura si inserirono parti in legno: catene di legno all’intersezione dei muri e negli angoli della costruzione, facendo attenzione anche ad ancorare i muri di spina alle pareti portanti; introduzione di sistemi misti in legno e terra al fine di dotare la struttura in adobe o tapial di uno scheletro elastico; sviluppo di un sistema combinato di legno e canne ricoperto di terra (quincha) che veniva utilizzato con due pareti affiancate e camera d’aria interposta tanto per i piani inferiori quanto per la realizzazione, nei piani superiori, di sottotetti, belvedere e simili; ricomparsa del cordolo di collegamento dei muri per collegare pareti-pareti e pareti-tetto. Inoltre si migliorò il disegno della costruzione, regolarizzando, attraverso l’uso del modulo, le facciate con una simmetria di aperture, di piccole dimensioni, uniformità delle lesene etc.

Sebbene la mancanza di una adeguata cultura storica abbia portato alla progressiva sostituzione dell’edificato storico con costruzioni realizzate in materiali contemporanei, la presenza e l’eccellente stato di conservazione, in ambiente rurale e urbano, di monumenti in terra realizzati seguendo questi crismi, testimoniano a tutt’oggi dell’efficacia e della buona qualità di queste costruzioni³² (Cirvini, Gomez, 2005).

Anche in Perù, ed in particolare nel centro storico di Lima, è possibile rilevare una stretta connessione tra le tipologie e la volontà di donare il sistema edilizio della capacità di resistere al terremoto. La regolarità in pianta e la diminuzione delle masse verso l’alto, ottenuta con l’utilizzo

³² Cirvini S. A., Gomez Voltan J. A., 2005, *Patrimonio Arquitectónico de tierra en área sísmica-el caso de la región de Cuyo-Argentina*, in *Terra em seminario*.

della quincha per realizzare i piani superiori, sono solo gli aspetti più evidenti. Il Perù ha una lunghissima tradizione nell'uso del crudo: il sito archeologico di Chan-Chan è stato costruito tra il XIII e il XV secolo a.C. La perizia dei costruttori Inca si manifesta nei resti del tempio di Wiracocha, a sud-est di Cuzco, dove si può apprezzare l'utilizzo di importanti concetti strutturali quali la diminuzione dello spessore murario verso l'alto e l'uso di architravi, costruiti con due tronchi d'albero paralleli posizionati a ridosso del muro in adobe. L'uso della quincha risale al periodo coloniale quando i terremoti del 1687 prima e del 1746 dopo provocarono la quasi completa distruzione della capitale. Fu emanata quindi un'Ordinanza Reale che limitava ad un unico piano le costruzioni in adobe e individuava come tecnologia appropriata per i piani superiori la quincha, di origine autoctona ma lievemente mutata al fine di consentire il migliore ancoraggio con le strutture sottostanti e col tetto. Gli edifici in terra del periodo coloniale e poi anche della prima era repubblicana sono, tipologicamente, pressoché quadrati in pianta e distribuiti simmetricamente, caratterizzati da pareti molto spesse e in proporzione minore di 6 tra altezza e spessore, con poche aperture, di dimensioni ridotte e centrate. Il piano superiore, poi, è costituito a formare un unico cordolo elastico a coronamento della struttura sottostante: il tetto è in legno ricoperto con uno strato di terra battuta e il solaio di interpiano è costituito da due tavolati con interposto uno strato di terra. Entrambe i solai sporgono rispetto alla struttura sottostante e sono collegati tra di loro da un fitto telaio in legno che funge da armatura principale per la quincha utilizzata per la tamponatura del secondo livello dell'abitazione.

La costruzione di case in terra in Perù ha continuato a crescere fino ai nostri giorni, tant'è che oggi circa il 40% dell'edificato nazionale è in terra. Purtroppo, anche qui, a poco a poco, si è andata perdendo la sapienza costruttiva in terra e le nuove costruzioni sono meno sismoresistenti, tant'è che tra gli anni '60 e '70 a fronte di terremoti di media intensità si sono rilevati grossi danni (Vargas et al., 2005).

Si evidenzia, pertanto, la necessità di ristabilire, nelle costruzioni di nuova realizzazione come negli interventi di restauro e consolidamento su edifici storici, una regola d'arte che individui gli elementi caratterizzanti di un edificio realizzato in terra per affrontare dignitosamente un terremoto.

Questo problema è stato affrontato e studiato a livello internazionale assumendo atteggiamenti diversi a seconda che si trattasse di ridurre la vulnerabilità di edifici storici o di costruire nuove case, in particolare nei paesi in via di sviluppo, con un adeguato comportamento al sisma. Di seguito si riportano le principali ricerche svolte in tal senso.

3.2. Tecniche di consolidamento

3.2.a. La conservazione dei beni monumentali: il Getty Conservation Institute

Il consolidamento antisismico finalizzato alla conservazione dei beni monumentali è caratterizzato da due istanze fondamentali:

1. la conservazione dell'identità storica e tecnologica del manufatto
2. l'adeguamento delle prestazioni dell'edificio alle moderne istanze di sicurezza

Molto spesso queste due tematiche sembrano essere in contraddizione: la necessità di incrementare opportunamente la capacità della struttura di resistere agli eventi sismici porta ad uno stravolgimento dell'apparato strutturale storico. La ricerca in questo campo è incentrata sulla identificazione delle tecniche appropriate, come le più adeguate alla natura storica, tecnologica e strutturale dell'edificio da consolidare. Per quanto riguarda i beni storici in terra cruda, presso il Getty Conservation Institute di Los Angeles, è stata svolta una campagna di sperimentazione durata 10 anni (1990-2000) in cui, su modelli in scala, sono stati testati su tavola vibrante diverse tecniche di consolidamento, scelte in funzione della loro efficacia strutturale e della più bassa possibile invasività.

L'efficacia strutturale è stata valutata in funzione dei dettami delle moderne normative antisismiche: lo scopo degli interventi di consolidamento è quello di prevenire i danni strutturali in presenza di terremoti moderati, mentre tali danni possono verificarsi in presenza di sismi di più alte intensità, anche se sono comunque da prevenire instabilità strutturali e collassi della struttura che possono provocare la perdita di vite umane.

Inoltre, lavorando per strutture con valore storico-architettonico, i dispositivi di consolidamento prescelti devono avere anche la capacità di prevenire il formarsi di lesioni in presenza di sismi moderati.

Si sono quindi sviluppati nuovi approcci per la progettazione dei rinforzi appositamente studiati per le costruzioni in adobe con un impatto minimo sulle stesse e comunque sempre reversibili. Gli obiettivi identificati per il consolidamento antisismico delle costruzioni storiche sono:

1. provvedere alla sicurezza delle vite umane durante i terremoti più severi
2. limitare il danno a livelli riparabili con i terremoti più forti
3. minimizzare i danni durante i terremoti moderati

La terra, se confrontata a materiali come l'acciaio o il calcestruzzo, è un materiale fragile e, come le murature in pietra o in mattoni cotti, è estremamente difficile predirne il comportamento dopo che sono cominciate le fratture. Il suo comportamento sismico è caratterizzato dall'interazione di larghe parti fratturate che o ruotano all'esterno del piano oppure si urtano tra di loro. Comunque, le fessurazioni del muro in terra, generate dalle forze sismiche così come da cedimenti fondali o da carichi differenziali, se non creano instabilità, non minano alle capacità portanti, per carichi verticali, della costruzione. Infatti, l'elevato spessore dei muri e l'aiuto dato dalla presenza di eventuali cordoli di collegamento col tetto, conferiscono alle pareti una certa stabilità: in molte costruzioni in adobe la snellezza λ è inferiore a 5. Il problema ritorna però nel caso di carichi non verticali quando la scarsa resistenza a trazione e poi la presenza di un quadro fessurativo preesistente, possono essere la causa dei crolli, parziali o totali delle strutture. In quest'ottica il consolidamento risulta essere efficace quando si aggiunge continuità alla costruzione, previene l'instabilità e fornisce vincoli che riducono lo spostamento relativo tra le parti di muro fratturato.

Tenendo ben presenti le problematiche su esposte, i criteri utilizzati per la valutazione delle strategie di intervento dal gruppo di lavoro del Getty, sono stati i seguenti:

1. "minimo effetto delle strutture sulle fabbriche storiche e reversibilità degli interventi
2. applicabilità delle soluzioni appropriate alle effettive condizioni dell'edificio
3. efficacia nella riduzione del danneggiamento severo e del rischio alla sicurezza delle vite umane

4. efficacia nella riduzione del danno durante eventi da moderati a severi
5. costo e difficoltà di installazione
6. utilizzo di tecniche di rapida installazione per la stabilizzazione di edifici danneggiati dal sisma". (Tolles et all, 2000 p'')

Si sono sperimentati 11 modelli in scala , i primi 9, in scala 1:5 e gli altri 1:2 e di questi i modelli 7-11 con tetto, mentre tutti gli altri senza. L'altra variabile è la snellezza.

Modelli	Scala	Snellezza	Presenza del tetto	Tipo di consolidamento
1	1.05	7,5	NO	A
2	1.05	7,5	NO	B
3	1.05	7,5	NO	D
4	1.05	5	NO	A
5	1.05	11	NO	Nessuno
6	1.05	11	NO	B
7	1.05	5	SI	C
8	1.05	7,5	SI	C ⁺
9	1.05	7,5	SI	Nessuno
10	1.02	7,5	SI	Nessuno
11	1.02	7,5	SI	C ⁺

Tabella 9

Il consolidamento è realizzato utilizzando sia elementi orizzontali che verticali. I primi sono costituiti da nastri di nylon, travi di collegamento e diaframmi parziali in legno, mentre i secondi sono realizzati o con strisce di nylon o con "forature armate", o con traversa di legno.

Il cordolo in legno, installato sui modelli 3 e 6 era in legno di abete Douglas con una lunghezza di 3,8 cm ed uno spessore di 1 cm, ancorato al muro attraverso delle lunghe viti a filettatura larga inserite in fori realizzati prima della collocazione. I nastri verticali ed orizzontali, invece, erano costituiti da nylon intrecciato e flessibile alti 0,3 cm ed erano sempre posizionati in modo da formare un anello o intorno l'intero edificio o intorno al singolo muro. I nastri erano stati fatti passare attraverso dei piccoli fori nella muratura e le due estremità collegate tra loro.

Gli elementi di collegamento per i nastri (Crossties) sono realizzati con corda di nylon del diametro di 0,16 cm e posizionate per ridurre lo spostamento differenziale tra le parti lesionate.

I “fori armati”, nei modelli 2 e 3, erano dei fori del diametro di 0,3 cm armati con tondini in acciaio inseriti per perforazione all'interno dell'armatura, mentre nel modello 8 avevano un diametro di 0,48 cm ed erano ancorati alla muratura con una resina epossidica. In quest'ultimo caso i fori sono stati realizzati con un trapano con punta di $\phi 0,6\text{cm}$ ottenendo un foro di 1 cm a causa della instabilità del supporto. Lo smontaggio dopo il test dei tondini ha evidenziato un effettivo diametro del nucleo di circa 1,3 cm.

Tutti i modelli sono stati testati su tavola vibrante uniassiale con spostamento massimo di 7,6 cm. Costruiti su di una piattaforma in cemento quadrata di lato 1,67 m, sono stati lasciati ad asciugare per 30 gg. prima di essere testati.

Per eseguire i test è stata scelta la componente N21E del terremoto del 1952 di Taft, California ed ogni modello è stato sottoposto a una serie di 10 simulazioni sismiche con un incremento del 20-30% tra l'una e l'altra. Lo spostamento massimo simulato è risultato essere 6-7 volte più grande di quello di riferimento.

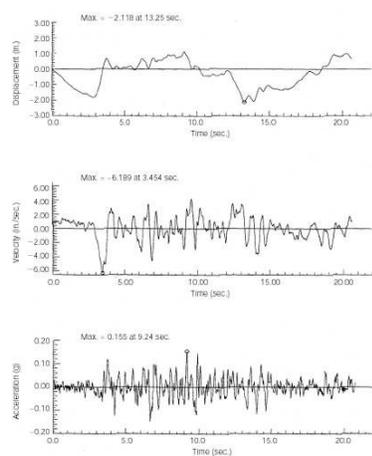


Fig. 39 Grafico del terremoto di Taft del 1952, spostamento, velocità, Accelerazione (Tolles E.L. et al, 2000)

Test level	Maximum EPGA ^a (g)	Maximum displacement cm	Maximum displacement in.
I	0.12	2.54	1.00
II	0.18	5.08	2.00
III	0.23	7.62	3.00
IV	0.28	10.16	4.00
V	0.32	12.70	5.00
VI	0.40	15.88	6.25
VII	0.44	19.05	7.50
VIII	0.48	25.40	10.00
IX	0.54	31.75	12.50
X	0.58	38.10	15.00

^aEstimated peak ground acceleration

Fig. 40 dati di simulazione del terremoto adoperati per i test su tavola vibrante (Tolles E.L. et al, 2000)

La durata di ogni evento sismico era di circa 20 secondi.

Nella tabella seguente si riporta la descrizione dei rinforzi per ogni modello.

Modello	Tipo di consolidamento
1	<ul style="list-style-type: none"> Nastri orizzontali superiori applicati su entrambe i lati delle quattro pareti a metà dello spazio tra la fine della parete e la sommità del muro. Nastro orizzontale inferiore applicato sulle facce sud ed est a 2/3 dell'altezza di imposta delle finestre. Crossties posizionate a 10 cm di interasse
2	<ul style="list-style-type: none"> Cordolo in legno. Fori armati sulle pareti est e nord. Nastri orizzontali sulla parte bassa delle pareti ovest e sud
3	<ul style="list-style-type: none"> Cordolo superiore in legno. Fori armati su tutte le pareti. Nastri orizzontali sulla parte bassa delle pareti
4	<ul style="list-style-type: none"> Come 1 con alcune crossties in più nei punti in cui si sono manifestate le lesioni sul modello 1.
5	NON CONSOLIDATO
6	<ul style="list-style-type: none"> Cordolo su tutte e quattro le pareti. Nastri verticali ed orizzontali applicati sulle pareti est e nord. Crossties nei punti in cui si prevedevano delle lesioni sulle facce ovest e sud.
7	<ul style="list-style-type: none"> Nastri orizzontali inferiori su entrambe i lati dei muri e su tutte e quattro le pareti e superiori solo esterni sulla quattro pareti. Crossties di collegamento per i nastri. Nastri verticali su entrambe i lati dei muri e su tutte le pareti eccetto quella est. Diaframma parziale in legno applicato su tutti i lati del modello in corrispondenza dell'altezza del solaio e su tutta la struttura portante del tetto. Ancoraggio del tetto attraverso cuscinetti in legno discontinui sulla parete (per evitare i fenomeni dovuti alla flessione) ancorati con chiodi autofilettanti.
8	<ul style="list-style-type: none"> Diaframma parziale in legno al piano attico e sul telaio del tetto. Nastro di nylon orizzontale attaccato al diaframma dell'attico al livello di piano. Nastri verticali ed orizzontali inferiori sulle pareti nord ed est su entrambe i lati. Fibra di vetro in fori trivellati e con resina epossidica. Nastro orizzontale inferiore posizionato all'interno di un foro sulla parete sud. Crossties di collegamento sia per i nastri verticali che orizzontali.
9	NON CONSOLIDATO
10	NON CONSOLIDATO
11	<ul style="list-style-type: none"> Fori armati in acciaio sulle pareti est e sud. Nastri verticali su entrambe i lati delle pareti est e nord. Nastri orizzontali inferiori su entrambe i lati e su tutte le pareti. Nastri orizzontali superiori sul lato esterno e su tutte le pareti. Diaframmi parziali in legno nel piano attico e sul tetto. Crossties di collegamento per i nastri.

Tabella 10

Dai test svolti si è evidenziato che:

- La fessurazione comincia con un EPGA (Estimated Peak Ground Acceleration) pari a 0,18-0,28g e quindi durante i test di

livello III-IV, ma il suo sviluppo completo si manifesta con i test di livello V-VI.

- La snellezza influenza il comportamento delle pareti fuori piano, infatti, per il livello di test IV i modelli con snellezza pari a 11 hanno presentato per le pareti caricate fuori piano un quadro fessurativo completo con la conseguenza che i carichi sono stati velocemente trasferiti alle pareti ortogonali, mentre i modelli con snellezza pari a 5 hanno subito danni molto lievi nelle pareti caricate fuori piano, mentre le pareti parallele al sisma hanno presentato un comportamento analogo a quelle più snelle con lesioni che si sono presentate agli angoli delle aperture.
- La trave di bordo è un amplificatore del meccanismo di collasso per rotazione sulle strutture snelle. Lo stesso non succede per le strutture di medie e bassa snellezza in cui la massa della muratura si oppone al fenomeno del ribaltamento e la trave di bordo ha un peso trascurabile.
- I modelli non consolidati sono completamente (modello 5) o quasi (modello 9) collassati durante il test di livello V.
- In corrispondenza dei test di livello VI i modelli 8 e 9 hanno mostrato efficacia dei collegamenti sulle pareti caricate fuori piano (che crollano nel modello non consolidato 9), mentre sulle pareti caricate nel piano, il quadro fessurativo si infittisce anche se le singole lesioni sono di dimensioni più piccole e non ci sono dislocazioni fuori piano.
- Durante il test di livello IX una grande sezione del muro snello caricato nel piano con cordolo (modello 6) è crollata, mentre la parete opposta, dotata anche di armature verticali, ne ha migliorato le prestazioni.
- La trave di bordo ha mostrato la sua efficacia nel trasmettere le sollecitazioni dalla parete caricata fuori piano a quella ad essa ortogonale, ma necessita di una struttura verticale supplementare per ridurre il distacco delle parti nelle pareti caricate nel piano.
- Il comportamento dei modelli è funzione sia della snellezza che del tipo di consolidamento; con pareti molto spesse si è reso necessario solo un minimo consolidamento (i primi segni di instabilità fuori piano si sono manifestati per test di livello X); con

pareti di spessore medio consolidate con nastri orizzontali il collasso totale si è manifestato per test di livello X; per le pareti sottili il collasso fuori piano si è manifestato per test di livello IX se lievemente consolidati e X con un consolidamento più efficace.

- Nei modelli 7-9 con le pareti con timpano, sollecitate fuori piano, si è verificato un ribaltamento se la parete non era rinforzata, mentre per quelle rinforzate, in funzione della snellezza, si è avuto un comportamento diverso; la parete snella ha subito una rotazione rispetto alla base con taglio in corrispondenza della striscia orizzontale, mentre sulla parete opposta, con armature verticali, i danni sono stati inferiori.

Nelle tabelle seguenti si riassumono gli esiti dei test in funzione della snellezza e dei consolidamenti messi in opera.

N° Modello e parete	Livello di collasso	Consolidamento fondamentali	Snellezza	Commenti
5	VII	Nessuno	Snello	Collasso completo
4 NE	NO	Nastri orizzontali superiori	Non snello	Sostanzialmente stabile con una traslazione rilevante dei blocchi
1 NE	X	Nastri orizzontali superiori	Media	Collasso fuori piano
4 SO	NO	Nastri orizzontali superiori ed inferiori	Non snello	Sostanzialmente stabile con una traslazione rilevante dei blocchi
1 SO	NO	Nastri orizzontali superiori ed inferiori	Media	Vicino al collasso durante la fase finale
6 SO	VIII	Trave di bordo, nastri orizzontali inferiori e con stipiti sulle porte e le finestre	Snello	Collasso fuori piano della parete est a livello VIII e di quasi tutta la facciata sud a livello IX
6 NE	NO	Trave di bordo, nastri inferiori orizzontali e nastri verticali	Snello	Pareti caricate fuori piano vicino al collasso e dislocamento degli architravi
2 NE	NO	Trave di bordo e armature verticali	Snellezza media	Comportamento stabile in tutti i test
2 SO	NO	Trave di bordo, nastri orizzontali inferiori interni e nastri verticali	Snellezza media	Comportamento stabile in tutti i test
3 NE	NO	Trave di bordo, nastri orizzontali inferiori interni e armature verticali	Snellezza media	Comportamento stabile in tutti i test
3 SO	NO	Trave di bordo, nastri orizzontali inferiori interni e armature verticali	Snellezza media	Comportamento stabile in tutti i test
9	VI	Nessuno	Snellezza media	Collasso completo della parete con timpano
8 NE	NO	Diaframma parziale in legno, nastro superiore a livello di piano, nastro inferiore e nastri verticali	Snellezza media	Comportamento stabile in tutti i test
8 SO	NO	Diaframma parziale in legno, nastro superiore a livello di piano e armature verticali	Snellezza media	Comportamento stabile in tutti i test
7 NE	NO	Diaframma parziale in legno, nastro superiore a livello di piano, nastro inferiore e nastri verticali	Non snello	Comportamento stabile in tutti i test
7 SO	X	Diaframma parziale in legno, nastro superiore a livello di piano, nastro inferiore	Non snello	Collasso parziale della parete sud (nel piano) durante il test di livello X

Tabella 11

Nei modelli 10 e 11 è stato possibile considerare anche delle forze gravitazionali che causano compressione nelle pareti. Per effettuare le prove sono stati opportunamente scalati i parametri caratterizzanti il sisma di riferimento.

Dalle prove si sono tratte le seguenti conclusioni:

- Le fessure su entrambe i modelli e sulle pareti sollecitate fuori piano cominciano a manifestarsi durante i test III e IV.
- Le prime fessure nelle pareti sollecitate nel piano cominciano a manifestarsi per un livello VII nel modello non consolidato e VIII per il modello consolidato.
- I nastri presenti sulla parete est del modello 11 sono capaci di fornire stabilità alla parete.
- La presenza delle armature verticali sulla parete est del modello 11 ha limitato il formarsi delle lesioni e contrastato il formarsi di meccanismi di collasso.
- I nastri non sono stati capaci di limitare il formarsi di lesioni a taglio.

Quindi, in conclusione, assodato l'esito prevalentemente buono dei provvedimenti adottati, si può asserire che:

- Il tipo di intervento deve essere commisurato alle caratteristiche geometriche e resistenti.
- Non sempre la presenza di rinforzi migliora le prestazioni dei manufatti ed in particolare, nelle pareti caricate nel piano, la presenza di elementi orizzontali aumenta la sollecitazione tagliante.
- I fori armati risultano essere i provvedimenti più efficaci anche se più invasivi.
- I nastri in nylon risultano essere particolarmente efficaci nell'impedire il crollo totale della costruzione su livelli di danno molto alti.
- La presenza delle travi di bordo favorisce la trasmissione delle sollecitazioni tra pareti ortogonali.

3.2.b. Il miglioramento delle prestazioni antisismiche dell'edilizia nei paesi in via di sviluppo e la ricerca svolta presso la Pontificia Università Cattolica do Perù (PUCP) di Lima.

La logica che sottende le ricerche svolte presso la PUCP è completamente diversa : lo scopo è di ottenere una tecnica costruttiva adoperabile in autocostruzione, da manodopera non specializzata, ed idonea per la realizzazione di case resistenti agli eventi tellurici.

Quindi lo scopo primario non è la riduzione dei danni all'edificio bensì il conferimento ad esso di una maggiore duttilità capace di prevenire il collasso immediato delle costruzioni e quindi di ridurre la perdita di vite umane.

In quest'ottica la scelta del materiale compatibile impone l'uso di elementi capaci di integrarsi alla muratura e di lavorare con essa fino a rottura.

«Si denomina terra armata il materiale costituito da terra e rinforzo di materiali compatibili, collocato al suo interno, che forma un corpo unico dal punto di vista meccanico, al fine di migliorare le proprietà resistenti di ambo i materiali»

Vargas et all , 2005 p 37

La ricerca sviluppata alla PUCP in oltre 35 anni è stata finalizzata alla stesura di un protocollo di azioni atte a mitigare la vulnerabilità delle costruzioni in terra caratterizzanti la maggior parte dell'edificazione nazionale. Partendo dall'analisi del comportamento meccanico dei materiali si è operata una serie di sperimentazioni tese a valutare l'incremento delle prestazioni di pannelli murari realizzati utilizzando gli adobe messi in opera "a regola d'arte".

Le conclusioni di questa ricerca sono state che :

- La quantità di argilla è fondamentale per la resistenza finale del manufatto
- La qualità dell'argilla è ininfluente
- Una eccessiva quantità di argilla provoca fessurazione da ritiro che riduce la resistenza al taglio del paramento murario
- La qualità dei giunti di malta è fondamentale per il comportamento globale della costruzione

In funzione di ciò si sono elaborati i procedimenti tesi ad assicurare una corretta messa in opera delle costruzioni in adobe: conservando l'impasto tradizionale dei mattoni, si è aggiunta della sabbia

all'impasto, a base di terra, per la malta al fine di mitigarne il ritiro e migliorare, a presa avvenuta, l'adesione tra i mattoni. Questi, prima di essere messi in opera, vengono immersi per una decina di minuti in acqua in modo da prevenire l'assorbimento per capillarità dell'acqua contenuta nella malta e, così facendo, rallentare il processo di essiccazione della stessa, riducendone la fessurazione.

Al fine di mitigare il comportamento fragile delle costruzioni in terra si è poi cominciata la sperimentazione dinamica di strutture in terra armata. Partendo dalla tradizione costruttiva si sono sperimentati una serie di moduli, prima su piano inclinato e poi su tavola vibrante monodirezionale, rinforzati con canne: all'interno delle murature in adobe, ogni 4 filari di mattoni, si dispone un letto orizzontale di canne tagliate a metà e alloggiato all'interno dei giunti di malta, mentre, in verticale si dispongono canne alla distanza pari ad una volta e mezzo lo spessore del muro (fig. 41).



Fig. 41 Rinforzo di pareti in adobe con canne.

Si è ottenuto così un netto miglioramento delle prestazioni antisismiche della costruzione: se la resistenza a compressione è rimasta pressoché invariata, quella a taglio ha subito un notevole incremento così come la resistenza a trazione della parete. Ciò ha comportato un incremento del 75% della resistenza al sisma rispetto alle pareti non rinforzate.

Con questa tecnica, sperimentata in laboratorio, sono state costruite alcune case a sud di Lima, ma gli esiti di questi programmi di sviluppo non hanno avuto seguito, un po' a causa del disinteresse degli Enti locali ma anche perché le canne, in molte aree del Perù, non sono di facile reperimento e quindi costituiscono un incremento notevole nel costo di costruzione degli edifici.

Consapevoli di ciò, i ricercatori hanno sviluppato quindi nuove tecniche che utilizzano materiali di derivazione industriale. È stato speri-

mentato un sistema che utilizza, come armatura verticale, tubi in PVC e, come armatura orizzontale, nastri di maglia “de pollaio” in plastica. Il comportamento dei moduli così rinforzati è stato ottimo, anche più di quelli rinforzati con le canne, mostrando una omogeneità di comportamento tra l’armatura plastica e la muratura.

Dal 1994 si è poi cominciata una campagna di sperimentazione tesa a migliorare il comportamento delle costruzioni esistenti, intendendo con ciò non i beni storico-monumentali ma le unità abitative presenti sul territorio.

In questa fase della ricerca sono stati sperimentati diversi tipi di rinforzi, dalle canne, ai diversi tipi di cordoli, alle maglie plastiche o di acciaio elettrosaldate ricoperte con malta di natura diversa. Tra i primi sistemi ad essere sperimentati c’era quello realizzato con rete elettrosaldata ricoperta con un impasto di cemento e sabbia e posizionato sia sulle facce esterne che interne delle pareti a formare dei cantonali ed una trave di bordo (fig. 42).



Fig. 42 Modello rinforzato con rete elettrosaldata (foto dell’autore)



Fig. 43 Modello rinforzato con maglia plastica (foto dell’autore)



Fig. 44 Modello rinforzato con maglia plastica dopo il test su tavola vibrante (foto dell’autore)

Questo sistema aumenta il livello di sicurezza sismica delle costruzioni in quanto ne incrementa la resistenza, ne controlla gli spostamenti e, quindi, ne posticipa il collasso. In questo modo la casa è capace di resistere a sismi lievi e moderati anche se poi, con terremoti severi, la struttura collassa in modo fragile. È proprio per fronteggiare questo problema che è stato studiato un sistema di rinforzo che utilizza una maglia di plastica che viene applicata su entrambi i lati delle pareti a fasciare la costruzione sia in verticale che in orizzontale e che è poi ricoperta di malta a base di terra e fango (fig. 43). Questo tipo di provvedimento si

è dimostrato particolarmente efficace in quanto la struttura giunge fino al collasso comportandosi omogeneamente e, in fase di collasso, presenta un comportamento duttile. Da notare che se la maglia è messa in opera senza intonaco superiore la maglia taglia in blocchi la muratura peggiorandone notevolmente il comportamento ed anticipandone il collasso (fig. 44).

Le tecniche di consolidamento fin qui esposte sono notevolmente invasive e sicuramente non si prestano al restauro e consolidamento di costruzioni monumentali, soprattutto in presenza di superfici affrescate o comunque decorate.

3.2.c. Altri centri di ricerca

Le ricerche condotte dal Getty Conservation Institute e dalla PUCP sono sicuramente le più complete ed approfondite svolte nel campo del consolidamento antisismico e del miglioramento delle prestazioni dei manufatti in terra, non fosse altro che per la continuità e la durata dei programmi sviluppati. Ma anche in altri centri di ricerca ed in altri paesi si sono condotte ricerche in tal senso raggiungendo molto spesso risultati eccellenti.

Un contributo non trascurabile in questo campo è sicuramente quello di Gernot Minke, impegnato da anni, presso l'Università di Kassel (Germania) e sul campo, nella sperimentazione con e sulla terra, autore di diversi testi tra cui un manuale per la corretta costruzione di manufatti antisismici in terra pubblicato in diverse lingue. Qui l'autore fornisce alcune informazioni di carattere generale (corretto posizionamento dell'edificio in prossimità di un terreno in pendenza e forma quantopossibile regolare della pianta) tra cui anche uno schema di quelli che sono i punti critici in una costruzione base in terra (fig. 45).

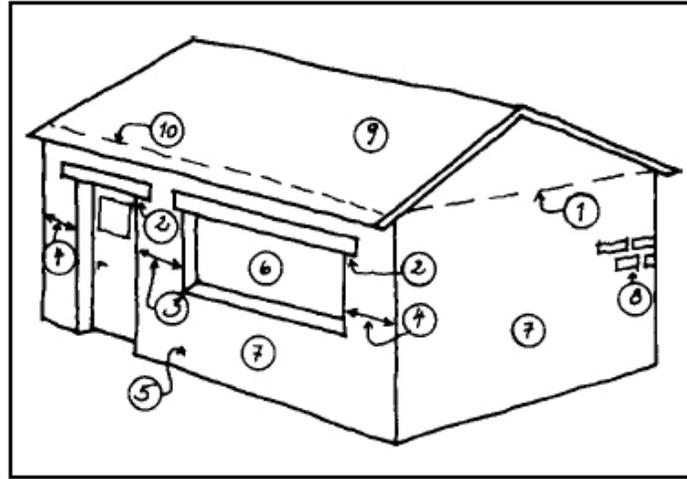


Fig. 45 Punti critici delle costruzioni in terra (Minke G., 2001)

Passa poi alla individuazione delle caratteristiche che deve avere una costruzione in terra antisismica, e scrive :

«Principalmente ci sono tre possibilità distinte per costruire una casa antisismica :

1. le pareti e la copertura devono essere talmente stabili che durante il terremoto non subiscono deformazioni
2. le pareti possono subire piccole deformazioni assorbendo l'energia cinetica del sisma grazie alla mutazione di forma. In questo caso la copertura deve essere ben ancorata con il muro attraverso un cordolo
3. le pareti devono essere costruite come nel secondo caso, però si deve progettare la copertura come un elemento strutturale isolato, vale a dire con colonne esterne al muro in modo che durante il terremoto entrambi i sistemi abbiano un movimento indipendente.»

Minke G.,2001, p. 12

Poiché la costruzione di edifici del tipo 1 comporterebbe l'utilizzo di espedienti non sostenibili, dal punto di vista economico ed ambientale, propone una serie di tecniche adatte a costruire pareti dotate di una certa deformabilità.

Utilizzando la tecnica del pisè costruisce degli elementi a forma di T (larghi 80 cm alti 40 cm e spessi 14-30 cm) armati in verticale con bambù (Φ 2-3 cm) ancorati, in basso, al basamento in pietra, ed, in alto, alle travi di bordo. In questo modo la resistenza agli urti orizzontali della parete (14 cm) risulta quadruplicata. La struttura finale è costituita da una serie di elementi verticali che si muovono, in caso di sisma, indipendentemente l'uno dall'altro, riducendo così le masse in gioco. La copertura ha una struttura indipendente (fig. 46).

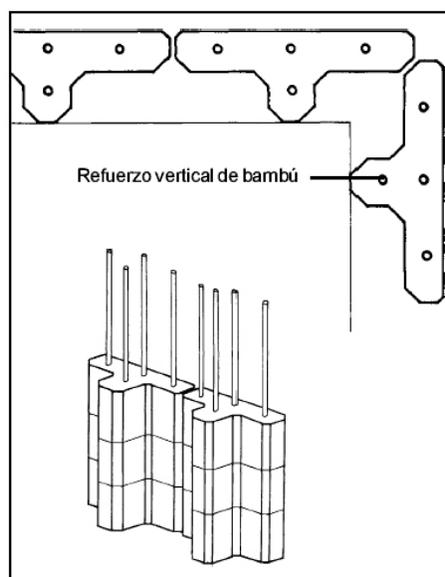


Fig. 46 Pareti in blocchi prefabbricati armati (Minke G., 2001)

Un altro modo per ottenere pareti deformabili è una rielaborazione della quinchia: su una struttura in legno sono alloggiati degli elementi cilindrici ottenuti attraverso il riempimento di sacchi di garza medica con terra oppure, sempre su struttura in legno, sono disposti dei sacchi a tutta altezza riempiti di terra. Entriamo qui però in un altro campo dove la terra serve solo da tamponamento ed irrigidimento per una struttura portante in legno.

Per la costruzione invece di sistemi strutturali rigidi ripropone una serie di accorgimenti sviluppati in altri centri di ricerca, dall'armatura con canne proposta dalla PUCP, alla costruzione di contrafforti esterni da

realizzarsi in tutte le intersezioni di pareti ortogonali ed in prossimità delle aperture (fig. 47), all'inserimento di rinforzi in calcestruzzo armato da realizzarsi in corrispondenza dell'intersezione delle pareti all'esterno o all'interno del nodo (fig. 48), all'utilizzo di un vero e proprio telaio in c.a.

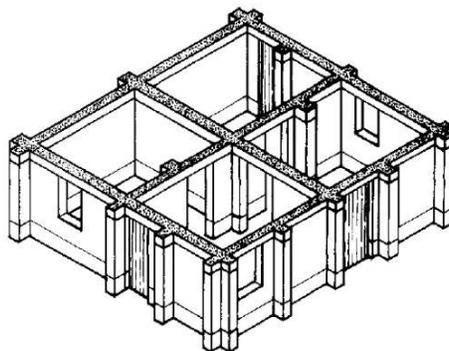


Fig. 47 Schema di rinforzo con contrafforti (Minke G., 2001)

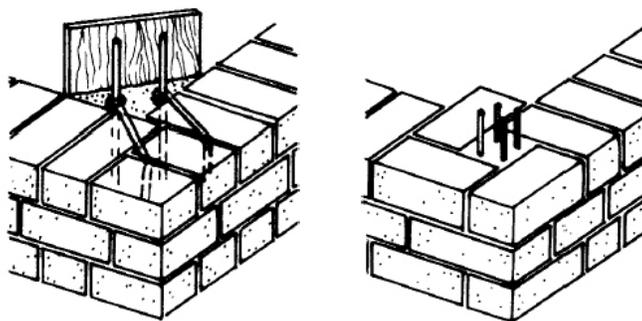


Fig. 48 Rinforzo dei nodi murari (Minke G., 2001)

Nella discussione e soluzione dei punti critici per una costruzione in terra Minke individua due punti cruciali: le fondazioni e la conclusione del muro.

Per quanto riguarda le fondazioni, queste possono essere dello stesso spessore o più larghe delle pareti superiori (al max di 20 cm) e devono avere un'altezza minima di 40 cm più 30 cm di "sobrecimento", la par-

te esterna delle stesse che funge da basamento alla parete isolandola dall'umidità di risalita e dall'attacco dell'acqua che si può accumulare alla base dell'edificio. La fondazione e il muro devono essere ben ancorati tra di loro utilizzando delle armature di ancoraggio (in genere in legno Φ 5-6 cm). Propone poi una fondazione mobile che, in caso di sisma, con spostamenti alla base, dovrebbe assorbire parte dell'energia.

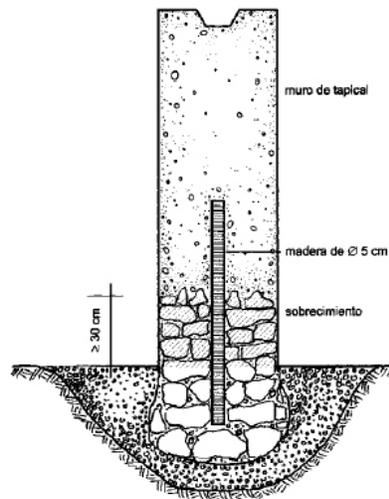


Fig. 49 Particolare delle fondazioni su cuscinetto di sabbia (Minke G., 2001)

Le pareti devono poi essere collegate tra di loro al fine di garantire un comportamento scatolare alla struttura; per fare ciò propone una serie di “escamotages” che utilizzano tanto il legno che il c.a., accomunati dalla necessità di essere ben ancorati alla muratura e possibilmente collegati alle fondazioni.

Tanti altri sono i manuali che riportano una serie di regole pratiche per l'adeguata costruzione in zona sismica di case in adobe, da quelli redatti dal gruppo di studio della PUCP, a quelli messicani a quelli venezuelani. Per brevità di trattazione qui si dirà che in tutti i manuali, impostati in maniera analoga, si consiglia di avere particolare attenzione nella scelta dei materiali e nella realizzazione delle fondazioni e del basamento. Si propongono quasi sempre tecniche di terra armata basata sugli studi condotti alla PUCP e già ampiamente illustrati.

Molto più scarsa è invece la documentazione e la sperimentazione per il miglioramento sismico di edifici storico-monumentali : eccetto le sperimentazioni del Getty non è giunta a chi scrive notizia di altri programmi di ricerca organica in questo settore ed, in generale, si tende ad applicare alle singole costruzioni da consolidare, quello che sembra il sistema di consolidamento al momento più appropriato, senza una adeguata conoscenza dell'interazione tra le strutture originarie e gli elementi aggiuntivi..

Nel paragrafo successivo si propone una selezione di alcuni interventi di recupero e consolidamento di edifici monumentali.

3.3. Interventi di restauro eseguiti su beni monumentali in zona sismica.

Si propone di seguito una selezione di tre interventi di restauro e consolidamento eseguiti su beni monumentali nelle diverse parti del mondo al fine di sottolinearne gli aspetti significativi dal punto di vista della metodologia di intervento e delle tecniche utilizzate.

3.3.a. Argentina-Valle di Calchaquies³³

Si è intervenuti su alcuni “pueblos” storici della zona, caratterizzati da un'architettura postcoloniale di cui gli elementi predominanti sono la chiesa, la piazza e la “fazenda”. Lo stato di degrado in queste aree è alto e può essere riassunto nei seguenti punti :

- Scomparsa degli intonaci e degrado superficiale dei paramenti murari
- Danni strutturali con lesioni e fessure, dovute a cedimenti fondali, e soventi dislocazioni e collassi parziali
- Umidità di risalita capillare alla base delle costruzioni
- Crollo parziale o totale delle coperture
- Superfetazione di unità precarie

³³ Castillo B. G., 2005, *Nueva intervención en pueblos históricos*, in Terra em Seminario

- Impianti installati in maniera precaria

Gli interventi di consolidamento messi in opera sono stati :

- Sottomurazioni in pietra e cemento realizzate nelle zone in cui le murature si presentavano più degradate alla base con perdita di materiali. In alcuni casi si è operato un cucì e scuci con sostituzione delle parti di muratura più degradata con altri adobe di fattura moderna ma in tutto uguali agli antichi.
- Rinforzo e ammorsamento delle pareti : per sanare i danni strutturali si sono utilizzate catene o fasce resistenti a trazione se non era possibile rimuovere i tetti. Nei casi in cui invece la rimozione delle coperture era necessaria è stata realizzata una trave di collegamento o un cordolo in legno al fine di assicurare il collegamento tra le pareti
- Grappe di fibra vegetale o di legno a seconda della gravità delle lesioni nelle parti in cui si presentava una dislocazione della muratura
- Rifacimento degli intonaci con un doppio strato : il primo costituito da terra, acqua e paglia ed il secondo da sabbie, terra setacciata e calce
- Rifacimento delle coperture nel rispetto della tecnologia originaria

3.3.b. *Muraglia islamica di Juromeda*³⁴

La muraglia medioevale di Juromeda, nel Portogallo del sud, è uno dei tanti esempi costruiti nella penisola iberica durante la colonizzazione araba. La struttura è realizzata in pisè e, soprattutto a causa del suo successivo abbandono, è ormai in un avanzato stato di degrado.

Costruita con una terra povera d'argilla con molta sabbia ed inerti grossi, a volte costituiti da cocci di ceramica, ha alle sue spalle un riporto di terra, probabilmente la terra scavata nella realizzazione delle mura superiori in pietra. Uno dei principali fattori di degrado del monumento

³⁴ Bruno P., 2005, *Contributo Para o estrudo e a Conservação de muracha islamica de Juromenha*, in Terra em Seminario.

deriva proprio dall'umidità assorbita per capillarità dal terreno retrostante. Questo fenomeno, associato all'azione dei sali igroscopici, è responsabile della intensa esfoliazione dei paramenti e della erosione della base della muraglia che ha causato il collasso di intere parti della costruzione. Proprio per questo il primo intervento proposto è il drenaggio della muratura ottenuto attraverso la realizzazione di un'intercapedine tra la parete ed il terrapieno al cui fondo è disposto un tubo con appropriata pendenza. Una volta drenata la muratura si procede al consolidamento delle zone più instabili e poi alla rimozione attenta delle infestazioni vegetali e animali con l'utilizzo, se necessario, di appositi insetticidi. Pulita e drenata la muratura si procederà alla sarcitura con blocchi di terra compressa nelle zone che, se lasciate inalterate, potrebbero generare altri crolli.

I blocchi di terra devono essere stabilizzati con calce ed essere ancorati alla struttura in pisè con malta ed eventualmente con una rete plastica o fibra di vetro.

3.3.c. *Muraglia nel castello "de Reina", Portogallo*³⁵

Anche questa era una cinta muraria in pisè risalente alle colonizzazioni arabe. Si è scelto di ricostruire la muraglia com'era e dov'era utilizzando la stessa tecnica (taipa) e lo stesso materiale (riconosciuto in laboratorio) ricostruendo anche le parti mancanti.

Tutti e tre gli interventi evidenziano una scarsa se non inesistente attenzione verso le istanze del restauro : riconoscibilità, reversibilità, scarsa invasività. A ciò si somma, purtroppo, una inadeguata conoscenza dei materiali con cui ci si confronta e della loro compatibilità con quelli adoperati : l'utilizzo del calcestruzzo ad esempio, potrebbe rivelarsi deleterio nel caso di eventi sismici. È quindi facile comprendere come l'antica cittadella di Arg-e-Bam, a restauro quasi completamente ultimato, sia crollata miseramente con il terremoto del 26 dicembre 2003.

³⁵ Rocha M., *Consolidação das muralhas de taipa no castelo de Reina*, in Terra em Seminário

3.4. Necessità di una cultura dell'intervento: il caso di Bam

Il 26 Dicembre 2003, all'ora locale 5:26:56, un terremoto di medio-forte intensità colpisce la città di Bam, situata nella zona Sud-Est dell'Iran. Il bilancio è tremendo: più di 40'000 morti e 25'000 feriti, la città quasi completamente rasa al suolo e uno dei più famosi ed interessanti siti archeologici in terra cruda completamente distrutti. I sismografi posizionati nell'area limitrofa la città, epicentro dell'evento, rilevano una PGA di 0,81g con 0,65g ondulatorio e 1,01g sussultorio. Sebbene la normativa antisismica iraniana sia moderna e ben congeniata, la città è andata quasi completamente distrutta, anche nella parte moderna.



Fig. 50 immagini di Bam prima e dopo il sisma (Adams B.J. et al,2004)

Perché tanta distruzione? Per la parte moderna della città si può con certezza asserire che le deficienze progettuali e di costruzione, la “povertà” dei materiali adoperati hanno sicuramente condizionato il comportamento catastrofico delle costruzioni che, a differenza di tante notizie mendaci diffuse dai media, erano state prevalentemente realizzate in c.a., in acciaio o murature di mattoni cotti. Ed è in questi edifici che sono morte le persone. La cittadella di Bam, infatti, era stata completamente abbandonata nella prima metà del secolo scorso e da allora, diventa monumento nazionale, era stata oggetto di interventi di restauro, ricostruzione e conservazione continui. Interventi che erano quasi giunti a conclusione il 26 Dicembre 2003. eppure quando è arrivato il sisma, ha quasi completamente raso al suolo Arg – e – Bam. Viene naturale chiedersi a cosa è dovuta la perdita completa di questo monumento su cui pure tanto lavoro era stato fatto. L’impressione di chi, attento conoscitore delle costruzioni in terra, ha visitato il sito poco dopo la distruzione, è stata quanto mai disarmante: non solo gli interventi di restauro effettuati non sono stati efficaci, ma addirittura hanno peggiorato notevolmente il comportamento dinamico dei manufatti al punto che, mentre parti che non erano state “restaurate” hanno superato discretamente il terremoto, le altre sono miseramente crollate.

Facendo un passo indietro, Arg – e – Bam è il frutto di una serie di stratificazioni, cominciate circa 2000 anni fa, e sorge su di una collina nei pressi della “Via della Seta”. Era uno dei più estesi centri interamente costruiti in terra cruda con una superficie occupata di quasi 240’000 m². Le strutture originarie erano in adobe, in Farsi “Khesht” ed in cob, in Farsi “Chinch”.

Dal report di Randolph Laugenbach³⁶ sullo stato della cittadella dopo il terremoto si evince che:

1. Nelle parti di muratura crollate c’è una forte presenza di termiti, con canali che attraversano le rovine, cosparsi degli escrementi di questi animali e con una evidente perdita di materiale.
2. Nelle diverse stratificazioni della cittadella, dalle più antiche a quelle moderne, alle strutture in Chinch degradate è stata affiancata o sovrapposta una costruzione supplementare in Khesht ottenendo così delle pareti a sandwich con il nucleo interno co-

³⁶ Langenbach R., 2005, *Collapse from the inside-out*, Sismo Adobe 2005, (atti convegno)

stituito da materiale dalle scarse prestazioni, oppure, e questo soprattutto per gli interventi più recenti, con strutture più rigide e pesanti delle originarie che sovrastano pareti con scarse capacità portanti (è il caso questo della ricostruzione di antiche volte in chinch ricostruite in khesht).

3. Presenza di meccanismi di collasso inaspettati, come l'implosione delle pareti, il crollo di edifici circolari dalla base, o il collasso di ali di edifici voltati in cui erano presenti dei contrafforti a fronte di altre ali, prive di contrafforti, che invece sono rimaste quasi intatte.
4. Discordanza tra i meccanismi di collasso individuati dalle ricerche del Getty e quelli osservati.

La presenza delle termiti è un fatto ricorrente in molte architetture storiche dell'area ed anche e soprattutto nelle parti di murature, interne alla cittadella, che non sono crollate. Quindi, se in un primo momento, ci si rende conto che l'impoverimento delle caratteristiche meccaniche dovuto alla presenza di queste colonie di insetti è solo una causa concomitante. Da evidenziare c'è che quando sono cominciati i restauri le termiti erano già presenti, ma non è stato utilizzato nessun provvedimento per risolvere questo problema, in più, i materiali utilizzati per le strutture di completamento erano ricche di paglia, alimento preferenziale degli insetti.

Altro punto dolente rispetto agli interventi effettuati, è il peso e lo scarso ancoraggio della nuova struttura rispetto alle vecchie. La componente prevalentemente sussultoria del terremoto ha significato un incremento notevole del peso gravante sulle strutture di base, più antiche, che avevano delle sovrastrutture realizzate con tecniche e materiali più pesanti. Questo problema si è evidenziato sia sulle costruzioni con volte e cupole, sia nelle mura della cittadella e nelle torri circolari perimetrali dove erano stati ricostruiti i coronamenti, i camminamenti e le merlature. Quando poi alla componente sussultoria si è associata quella ondulatoria, il disastro è stato completo e questo anche a causa di un inopportuno collegamento tra parti orizzontali e verticali: la mancanza di legno nella zona aveva indotto i costruttori antichi a realizzare le coperture in terra, ma l'esperienza, la cultura costruttiva locale e la conoscenza empirica degli effetti dei terremoti sulle strutture li avevano portati, oltre che a scegliere la tecnica costruttiva più leggera ed elastica, anche ad utilizzare parti di tronco di palma da dattero per realizzare i collega-

menti tra le strutture voltate e le grosse pareti sottostanti a cui, in questo modo, era conferita una certa elasticità. Tutto ciò è stato completamente dimenticato negli interventi di costruzione.

L'esempio emblematico della inappropriatazza dei lavori effettuati è nella "Small Caravansary" (fig. 51), un edificio a corte costituito da celle voltate a due livelli. Una delle pareti della corte era stata dotata, dal lato esterno, di contrafforti che coprivano tutta l'altezza dell'edificio; il sisma ha completamente distrutto questo lato, parzialmente danneggiato il lato ad esso ortogonale e lasciato intatto il lato opposto su cui non si era intervenuti se non con una "pulitura di facciata". Ancora da evidenziare è che i contrafforti sono rimasti intatti eccetto uno che ha subito un cedimento in fondazione.



Fig. 51 L'edificio detto Small Caravansery (Langenbach R., 2005)

C'è comunque ancora da evidenziare che problemi si sono verificati anche dove c'era la congiunzione tra parti antiche costruite in epoche diverse e questo sia nelle pareti con nucleo interno e parte esterna costruite in epoche diverse, sia nelle pareti ottenute per sovrapposizione di murature non coeve. Nel primo caso si è assistito alla implosione della muratura, con la parte interna che, compattandosi per effetto del

moto sussultorio, ha spinto verso l'esterno gli strati costruiti in adobe (fig. 52).



Fig. 52 Implosione delle pareti (Langenbach R., 2005)

Nel secondo caso, invece, si è assistito alla formazione di un quadro fessurativo espressivo della separazione tra i diversi layers di muratura. In conclusione, si può dire che le cause della distruzione della cittadella sono:

1. Presenza delle termiti.
2. Alta componente sussultoria dell'evento sismico.
3. Disomogeneità dei materiali da costruzione.
4. Imperizia e distrazione degli interventi di restauro.

Se sull'accidentalità obiettiva del tipo di sisma niente si può fare, per gli altri tre punti sicuramente è auspicabile la formulazione di una metodologia di intervento che traendo insegnamento da questa e da altre esperienze sia capace di fornire un indirizzo e una base di conoscenza per chi interviene sulle costruzioni in terra.

Sicuramente sarebbe auspicabile la formazione di tecnici specializzati capaci di saper interpretare al meglio lo stato di degrado ed i problemi che presentano i singoli manufatti in funzione dei fattori del tutto contingenti, ma questo vale per qualsiasi tipo di costruzione storico-monumentale, troppo spesso oggetto di veri e propri atti di violenza.

Per quanto riguarda invece la metodologia, si propone di seguito una scheda per il rilievo della vulnerabilità sismica degli edifici in terra da cui, oltre ad ottenere un indice di vulnerabilità, sarà anche possibile individuare le principali carenze strutturali dei manufatti ed in base a queste progettare gli eventuali interventi di consolidamento.

Cap. 4. Valutazione del comportamento sismico delle costruzioni in terra

4.1. Meccanismi di collasso

Di seguito si riportano i principali meccanismi di collasso osservati per le costruzioni in terra, sia sulla sorta di sperimentazioni effettuate in laboratorio che dopo eventi sismici, dividendo tra meccanismi dovuti a moti sussultori e meccanismi dovuti a moti ondulatori e, in questo secondo gruppo, tra pareti sollecitate nel loro piano e pareti sollecitate ortogonalmente.

4.1.a. Spinta orizzontale – pareti sollecitate nel loro piano

Per le pareti sollecitate nel piano la spinta orizzontale provoca uno spostamento differenziale tra la parte inferiore e quella superiore del muro con un conseguente effetto di taglio sulla superficie (fig. 53).

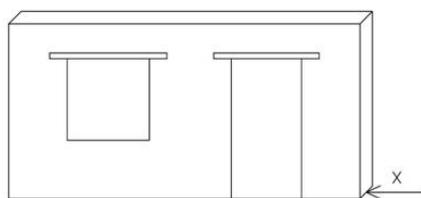


Fig. 53 Schema di carico per parete sollecitata nel piano

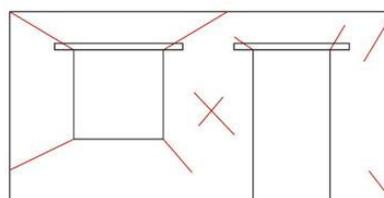


Fig. 54 Quadro fessurativo

Il quadro fessurativo tipico di questa sollecitazione è la formazione di lesioni o fessure a $\sim 45^\circ$ (fig. 54).

I meccanismi di collasso osservati sono i seguenti:

1. traslazione verso l'esterno del paramento delle parti di muratura in prossimità delle aperture (fig. 55).
2. collasso delle parti sovrastanti le aperture (fig. 56)
3. rotazione degli elementi tra le aperture (asse di rotazione verticale) (fig. 57)
4. sfilamento degli architravi (fig. 58)

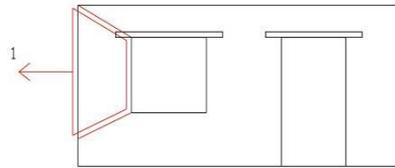


Fig. 55 Meccanismo di tipo 1

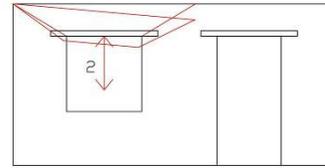


Fig. 56 Meccanismo di tipo 2

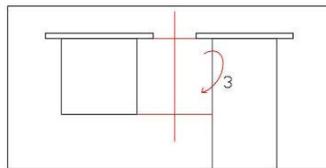


Fig. 57 Meccanismo di tipo 3

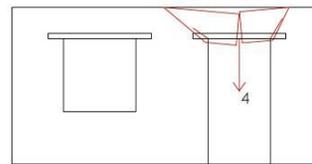


Fig. 58 Meccanismo di tipo 4

4.1.b. Spinta orizzontale – ortogonalmente al piano

Nelle pareti sollecitate fuori piano (fig. 59) lo spostamento differenziale tra la parte superiore ed inferiore dell'elemento si traduce prevalentemente in una sollecitazione di momento che genera rotazioni di porzioni o di tutta la muratura fuori del suo piano di giacitura.

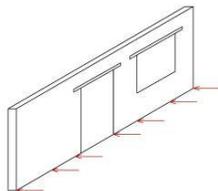


Fig. 59 Schema di carico per parete sollecitata nel piano

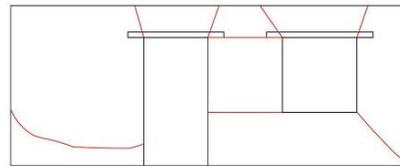


Fig. 60 Quadro fessurativo

Il quadro fessurativo (fig. 60) è caratterizzato da lesioni orizzontali sulle parti più estese della muratura e da lesioni inclinate agli angoli delle aperture. Le lesioni orizzontali sono in genere rappresentative degli assi in cui si formano le cerniere cilindriche rispetto alle quali rotano i diversi meccanismi:

1. rotazione della parete (si manifesta soprattutto in assenza di aperture) (fig. 61).

2. rotazione della parte al disopra delle aperture

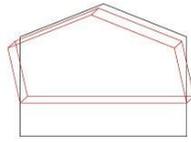


Fig. 61 Meccanismo di tipo 1

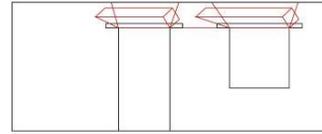


Fig. 62 Meccanismo di tipo 2

3. rotazione parziale del paramento murario

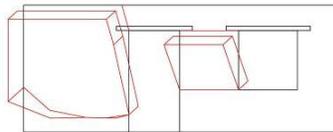


Fig. 63 Meccanismo di tipo 3

Sulle facciate caricate lungo il piano è possibile poi che si verifichino delle rotazioni agli angoli dovuti ai meccanismi fuori piano delle pareti ortogonali che si possono manifestare anche come lesioni verticali in prossimità degli angoli (nelle pareti sollecitate nel piano) (fig. 64)

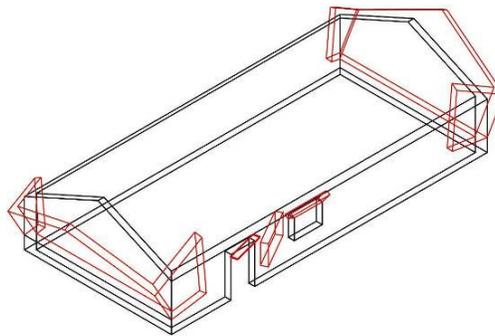


Fig. 64 Meccanismi combinati

4.1.c. *Spinta verticale*

La spinta verticale è dovuta ai moti sussultori dell'evento sismico ed è in genere trascurabile rispetto a quella orizzontale. Nel caso di particolare vicinanza alla sorgente epicentrale questo fenomeno assume caratteristiche più rilevanti, soprattutto in presenza di "murature a sacco" o di particolare debolezza del paramento.

1. nel caso di murature a sacco con il riempimento costituito da materiale sciolto, o comunque di scarsa consistenza e coesione, la compattazione della parte interna provoca sui paramenti esterni una spinta orizzontale che fa "spanciare il muro" provocando anche uno schiacciamento alla base. Un fenomeno analogo si può verificare anche nelle murature a più teste quando gli adobes non sono adeguatamente ammortati
2. schiacciamento del paramento murario alla base con conseguente fenomeno di liquefazione (il materiale alla base perde coesione)
3. per effetto dello schiacciamento si creano delle "colonne" di muratura che si comporteranno come parti indipendenti, il che peggiora notevolmente il comportamento del pannello murario rispetto alle spinte ortogonali al piano

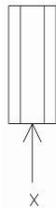


Fig. 65 Schema di carico

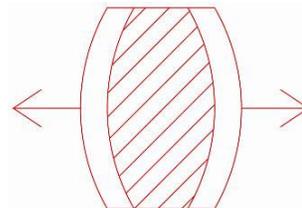


Fig. 66 Meccanismo di tipo 1

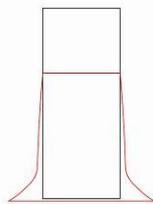


Fig. 67 Meccanismo di tipo 2

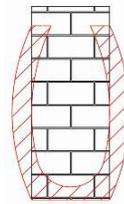


Fig. 68 Meccanismo di tipo 3

4.1.d. Archi, volte e cupole

Questi tipi di strutture, in genere realizzate in adobe, hanno un comportamento analogo a quello degli stessi elementi costruiti in muratura tradizionale. Da notare che, a causa delle scarse proprietà meccaniche del materiale, i fenomeni di schiacciamento sono più consistenti e più di frequente, per le cupole, si può verificare il collasso per inversione della curvatura.

4.2. Valutazione del rischio sismico: metodi per la valutazione della vulnerabilità

Il rischio sismico è la stima dei danni (economici, culturali e materici) che si possono generare sul costruito per effetto di eventi sismici, in un dato periodo di tempo ed in una certa area. La sua valutazione è legata alla determinazione di tre parametri:

- Pericolosità sismica (seismic hazard: H) definita come caratteristica tipica dell'area su cui si estende il sistema e determinata in base alle proprietà geologiche del territorio e alla probabilità che si manifesti un evento di una certa intensità con una certa frequenza.
- Vulnerabilità (V) strettamente legata alle caratteristiche costruttive del sistema, rappresenta la propensione al danno degli elementi fisici e funzionali che lo costituiscono.
- Esposizione (E) è legata alle caratteristiche insediative dell'area ed alle attività che possono essere influenzate dall'evento sismico.

Il rischio sismico R può essere visto come una funzione non lineare delle tre variabili su esposte:

$$R = f(H, V, E)$$

La riduzione del rischio sismico implica la permanenza di un rischio residuo che sarà detto accettabile se è tale per la società in funzione di valutazioni di carattere economico e finanziario.

Se per la valutazione della esposizione e della pericolosità, poco cambia rispetto alle caratteristiche costruttive dei singoli manufatti, per la vulnerabilità e in particolare la vulnerabilità strutturale, è fondamentale una analisi specifica e differenziata in base al sistema costruttivo. attualmente non è stato formulato un metodo specifico capace di valutare la vulnerabilità delle costruzioni in terra.

In generale si può dire che la vulnerabilità misura la perdita o la riduzione di efficienza di un sistema a seguito di un sisma ed anche la capacità che tale sistema ha di continuare ad ottemperare alle funzioni che svolge a regime. Presuppone pertanto una valutazione anche di carattere economico, come stima del costo di adeguamento sismico a confronto con il costo di costruzione. In tal senso la valutazione della vulnerabilità è soggetta ad una serie di variabili spazio temporali che non permettono il raggiungimento di un ottimo decisionale essendo legata a fattori contingenti interni alle politiche socioeconomiche locali.

I diversi fattori che contribuiscono alla definizione di vulnerabilità sismica di un sistema possono essere divisi in tre componenti principali: vulnerabilità diretta (V_1), definita in rapporto alla propensione dell'elemento fisico a subire collasso; vulnerabilità indotta (V_2), definita in rapporto alla crisi del sistema generata dal collasso di un elemento funzionale; vulnerabilità differita (V_3) che tiene conto degli effetti ritardati del sisma.

$$V = f(V_1, V_2, V_3)$$

In questa sede, in rapporto alla specificità dell'argomento, si approfondirà solo la vulnerabilità diretta, ed in particolare la vulnerabilità strutturale, rappresentativa della capacità della struttura di fronteggiare un sisma ed esprimibile attraverso il danno d che subisce a seguito di un sisma di intensità s :

$$V_s = d(s)$$

Al fine di quantizzare la vulnerabilità strutturale, sarà necessario:

- Individuare un parametro d di misura del danno
- Individuare un parametro s di misura della severità del sisma

- Stabilire una legge di correlazione tra il danno e la severità del sisma

4.2.a. La misura del danno

Il metodo più immediato per una valutazione del danno è quello economico ma come detto in precedenza è un tipo di valutazione legata a fattori locali e contingenti. Per avere una stima del danno più generale si può fare invece riferimento ad indici qualitativi o meccanici. I primi sono quelli inclusi nelle scale macrosismiche e riferiti all'entità del danno (nullo, lieve, ..., collasso) e che, se da un lato offrono il vantaggio di fornire una lettura del danno che non privilegia nessun aspetto particolare, dall'altro hanno due svantaggi: possono essere soggetti ad interpretazioni soggettive e sono variabili discontinue. La continuità della variabile può essere recuperata introducendo l'indice di danno definito nell'intervallo continuo (0,1). Una stima del danno di questo tipo può essere fatta attraverso la compilazione della "sezione 8" (fig. 69) della scheda di rilevamento del GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti), denominata "Scheda di primo livello per il rilevamento dell'esposizione e della vulnerabilità degli edifici". Prendendo in considerazione quattro componenti costruttive (strutture verticali, orizzontali, scale e tamponature) si registra per ognuna di esse e per ogni piano il livello del danno massimo presente, del danno più esteso e della sua estensione. Il danno (d_{ij}) per ogni componente i -esima e per ogni piano j -esimo è ottenuta tramite la formula:

$$d_{ij} = e d_e + (1 - e) d_m / 3$$

dove:

d_e = livello di danno più esteso sulla componente i -esima del piano j -esimo;

e = estensione percentuale del danno;

d_m = danno massimo presente sulla componente i -esima.

Il danno globale (d) dell'edificio si ottiene come media pesata degli indici di danno:

$$d = \sum_{ij} S_i F_j d_{ij}$$

Utilizzando il primo metodo si potrà disporre di un catalogo più ampio di terremoti cui riferirsi mentre, con il secondo, si ci potrà riferire solo agli eventi più recenti per cui sono disponibili delle registrazioni strumentali ma, contemporaneamente, sarà più facile da adoperare nei modelli meccanici. Diversi autori si sono impegnati a formulare leggi empiriche accelerazione-intensità capaci di far passare da una stima in base all'intensità macrosismica ad una in base all'accelerazione. Le più usate sono quelle di Guttenberg-Richter:

$$\log(y) = 0.333 \cdot I - 0.5$$

E quella di Gaudenti-Petrini:

$$\ln(y) = 0.602 \cdot I - 7.073$$

4.2.c. Correlazioni danno severità del sisma

La legge di correlazione d-s può essere individuata seguendo vari approcci. Si parla di *vulnerabilità osservata* quando si è in presenza di informazioni di tipo storico e si possono stabilire relazioni tra danni subiti da edifici di tipologia simile ed eventi sismici. Le metodologie di analisi saranno quelle basate su dati statistici. Si parlerà invece di *vulnerabilità prevista* se si conoscono tutti i dati dell'input sismico e attraverso modelli o "edifici tipo" si supporranno le probabilità di danneggiamento per i diversi tipi di strutture attraverso un approccio teorico alla risposta dinamica.

In Italia sono diffuse due metodologie basate sulla vulnerabilità osservata e sviluppate dal GNDT:

- Metodologia di 1° livello o delle matrici di probabilità di danno (DPM)
- Metodologia di 2° livello o dell'indice di vulnerabilità

La metodologia di 1° livello divide il costruito per tipologie edilizie ed associa ad ognuna di esse e per ogni input sismico (misurato in intensità macrosismica) un livello di danno di tipo qualitativo (descritto in base al quadro fessurativo). È quindi un metodo di tipo:

- quantitativo: fornisce il risultato (danno) in termini probabilistici o deterministici

- tipologico: valuta il comportamento del costruito attraverso la sua suddivisione in tipologie edilizie
- statistico: ricerca il risultato attraverso l'elaborazione statistica dei dati osservati dopo eventi sismici
- diretto: fornisce il risultato come previsione tra l'intensità del sisma e la probabilità di danneggiamento degli edifici.

Le DPM (Damage Probability Matrix), sviluppate da Braga et all.³⁷ in seguito al terremoto dell'Irpinia del 23 Novembre 1980, forniscono per ogni assegnato grado di intensità sismica la probabilità che si verifichi un determinato livello di danno per una definita classe di edifici. Per definire tali matrici si è partiti considerando:

1. per la definizione dell'intensità macrosismica si è considerata la scala MSK-76
2. coerentemente con tale scala, alle tipologie edilizie sono assegnate tre classi di vulnerabilità (tabella 11)

Classi di vulnerabilità secondo la scala MSK-76	
classe A	Case in materiali scadenti, costruzioni in pietrame naturale, costruzioni rurali, case in mattoni crudi o con malta di argilla, Case con argilla o limo
classe B	Costruzioni in mattoni comuni, in grossi blocchi o in prefabbricati, murature con telai di legname, costruzioni in pietra squadrata.
classe C	Edifici rinforzati, costruzioni armate, strutture in legno ben fatte

Tabella 12

In base alle caratteristiche delle strutture verticali ed orizzontali si sono individuate 13 tipologie costruttive (Tabella 12).

³⁷ Braga F., Dolce M., Liberatore D.,1982, *A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of M.S.K.-76 scale*, 7th European Conference on Earthquake Engineering, Atene; Braga F., Dolce M., Liberatore D.,1985, *Statistical Analyses of Damage Data from 23.11.80 Italy Earthquake*, U.S.-Italy Workshop on Seismic Hazard and Risk Analysis , Varenna; Braga F., Dolce M., Liberatore D.,1987, *Rassegna critica dei metodi per la stima della vulnerabilità*, Atti del 3° Convegno Nazionale Ingegneria Sismica in Italia, Roma

		Strutture Verticali			
		Muratura in pietrame non squadrato	Muratura in pietrame sbizzato	Muratura in mattoni o blocchi	Cemento armato
Strutture Orizzontali	Volte	1	5	9	/
	Solai in legno	2	6	10	/
	Solai con putrelle	3	7	11	/
	Solai in c.a.	4	8	12	13

Tabella 13

Ad ognuna di esse è stata associata la classe di vulnerabilità (Tabella 13), soprattutto in funzione delle strutture orizzontali che vengono ad assumere un ruolo primario nel comportamento sismico dei manufatti edilizi (diaframma rigido di piano).

		Strutture Verticali			
		Muratura in pietrame non squadrato	Muratura in pietrame sbizzato	Muratura in mattoni o blocchi	Cemento armato
Strutture Orizzontali	Volte	A	A	A	/
	Solai in legno	A	A	C	/
	Solai con putrelle	B	B	C	/
	Solai in c.a.	C	C	C	C

Tabella 14

Si sono poi definiti sei livelli qualitativi di danno associati al quadro fessurativo (Tabella 14).

Livello di danno	Descrizione
0	nessun danno
1	danno lieve: sottili fessure e caduta di piccole parti di intonaco
2	danno medio: piccole fessure nelle pareti, caduta di porzioni consistenti di intonaco, fessure nei camini parti dei quali cadono
3	danno forte: formazione di ampie fessure nei muri, caduta dei camini
4	distruzione: distacchi fra le pareti, possibile collasso di porzioni di edifici, parti di edifici separate si sconnettono, collasso di pareti interne
5	danno totale: collasso totale dell'edificio

Tabella 15

La distribuzione del danno per ciascuna classe tipologica (A,B,C) e ciascun grado di intensità (I) è descritta tramite la formula:

$$p_{hki} = \frac{5!}{5!(5-k)!} d_{hi}^k (1-d_{hi})^{5-k}$$

dove:

p_{hki} = probabilità di avere sulla classe tipologica h (A,B,C) un livello di danno k (0,1,2,3,4,5) per effetto di una azione sismica di intensità i (V, VI, VII, VIII, IX, X)³⁸

d_{hi} = danno ricavato dalle tabelle 15 e 16 dedotte in seguito al sisma del 1980

		Intensità macrosismica					
		V	VI	VII	VIII	IX	X
Classi	A	0,02	0,284	0,423	0,726	0,86	0,923
	B	0,01	0,185	0,284	0,501	0,7	0,85
	C	0,005	0,065	0,167	0,334	0,5	0,7

Tabella 16 Coefficienti binomiali di danno rilevati in seguito al sisma del 1980 per condizioni geologiche medie

		Intensità macrosismica					
		V	VI	VII	VIII	IX	X
Classi	A	0,022	0,417	0,667	0,883	0,91	0,95
	B	0,022	0,25	0,5	0,667	0,833	0,91
	C	0,022	0,167	0,333	0,5	0,667	0,833

Tabella 17 Coefficienti binomiali di danno rilevati in seguito al sisma del 1980 per condizioni geologiche scarse

Di seguito si riportano le DPM costruite in base alla formula su scritta per p_{hki} , per le tre classi di vulnerabilità e per entrambe le condizioni geologiche del terreno di fondazione.

³⁸ Non essendosi verificati, in occasione del sisma dell'Irpinia del 1980, danni per intensità sismiche inferiori a V, non vengono considerate le intensità tra I e IV.

Intensità ("I")	Livello di danno ("k")					
	0	1	2	3	4	5
V	0,903920797	0,0922368	0,003765	0,000076832	0,000000784	3,2E-09
VI	0,188176381	0,373199	0,296057	0,117430542	0,023289297	0,00184753
VII	0,063955672	0,2344302	0,343723	0,251983862	0,092364969	0,01354259
VIII	0,001544375	0,0204602	0,108424	0,287283701	0,38059848	0,20168941
IX	1,61051E-05	0,0006515	0,010543	0,085301249	0,345082326	0,55840594
X	2,70678E-06	0,0001622	0,003889	0,046621533	0,279426463	0,66989773

Tabella 18 DPM per edifici di classe A con condizioni geologiche medie

Intensità ("I")	Livello di danno ("k")					
	0	1	2	3	4	5
V	0,95099	0,04803	0,0009703	9,8E-06	5E-08	1E-10
VI	0,35957	0,40811	0,18527477	0,04206	0,00477	0,00022
VII	0,18818	0,3732	0,29605728	0,11743	0,02329	0,00185
VIII	0,03094	0,15531	0,31187251	0,31312	0,15719	0,03156
IX	0,00243	0,02835	0,1323	0,3087	0,36015	0,16807
X	7,6E-05	0,00215	0,02438438	0,13818	0,3915	0,44371

Tabella 19 DPM per edifici di classe B con condizioni geologiche medie

Intensità ("I")	Livello di danno ("k")					
	0	1	2	3	4	5
V	0,97525	0,0245	0,00025	1,2E-06	3,1E-09	3,1E-12
VI	0,71459	0,24839	0,03454	0,0024	8,3E-05	1,2E-06
VII	0,40107	0,40204	0,1612	0,03232	0,00324	0,00013
VIII	0,13103	0,32856	0,32955	0,16527	0,04144	0,00416
IX	0,03125	0,15625	0,3125	0,3125	0,15625	0,03125
X	0,00243	0,02835	0,1323	0,3087	0,36015	0,16807

Tabella 20 DPM per edifici di classe C con condizioni geologiche medie

Intensità ("I")	Livello di danno ("k")					
	0	1	2	3	4	5
V	0,894734686	0,1006348	0,004528	0,000101846	1,14551E-06	5,1536E-09
VI	0,067350802	0,2408686	0,34457	0,246459336	0,088141975	0,01260899
VII	0,004094691	0,0410084	0,16428	0,329053086	0,32954716	0,13201679
VIII	2,19245E-05	0,0008273	0,012488	0,094244027	0,355630238	0,53678889
IX	5,9049E-06	0,0002985	0,006037	0,061039251	0,308587325	0,62403215
X	3,125E-07	2,969E-05	0,001128	0,021434375	0,203626563	0,77378094

Tabella 21 DPM per edifici di classe A con condizioni geologiche scarse

Intensità ("I")	Livello di danno ("k")					
	0	1	2	3	4	5
V	0,89473	0,10063	0,00452754	0,0001	1,1E-06	5,2E-09
VI	0,2373	0,39551	0,26367188	0,08789	0,01465	0,00098
VII	0,03125	0,15625	0,3125	0,3125	0,15625	0,03125
VIII	0,00409	0,04101	0,16427988	0,32905	0,32955	0,13202
IX	0,00013	0,00324	0,03231762	0,1612	0,40204	0,40107
X	5,9E-06	0,0003	0,00603685	0,06104	0,30859	0,62403

Tabella 22 DPM per edifici di classe B con condizioni geologiche scarse

Intensità ("I")	Livello di danno ("k")					
	0	1	2	3	4	5
V	0,89473	0,10063	0,00453	0,0001	1,1E-06	5,2E-09
VI	0,40107	0,40204	0,1612	0,03232	0,00324	0,00013
VII	0,13202	0,32955	0,32905	0,16428	0,04101	0,00409
VIII	0,03125	0,15625	0,3125	0,3125	0,15625	0,03125
IX	0,00409	0,04101	0,16428	0,32905	0,32955	0,13202
X	0,00013	0,00324	0,03232	0,1612	0,40204	0,40107

Tabella 23 DPM per edifici di classe C con condizioni geologiche scarse

Questo tipo di analisi è indicata nel caso si vogliano condurre analisi di vulnerabilità di grandi popolazioni di edifici. In appendice si riporta la scheda di 1° livello del GNDT, basata su questo metodo.

La metodologia di 2° livello è invece basata sulla definizione di un indice di vulnerabilità caratterizzante la propensione al danneggiamento dell'edificio. La valutazione si attua attraverso la compilazione di una scheda di rilievo differenziata in base al materiale di costruzione.

È questa una valutazione di tipo:

- semiotico: attribuisce ad ogni edificio un indice di vulnerabilità I_v determinato in funzione di parametri ritenuti rappresentativi della propensione dell'edificio a subire danni
- indiretto: determina prima I_v e poi la correlazione danno-severità del sisma
- quantitativo: fornisce il risultato (danno) in termini numerici (probabilistici o deterministici)

La scheda attualmente utilizzata per l'analisi della vulnerabilità delle costruzioni in muratura è costituita da 11 parametri ad ognuno dei quali sono associate quattro classi di vulnerabilità (A,B,C,D) ordinate in ordine crescente di vulnerabilità. Ad ogni classe di ogni parametro è as-

sociato un coefficiente c_{vi} , e ad ogni parametro un peso p_i valutativo del contributo del parametro nel comportamento globale della struttura

Parametro		Classe c_v				Peso p_i
		A	B	C	D	
1	Tipo ed organizzazione del sistema resistente	0	5	20	45	1
2	Qualità sistema resistente	0	5	25	45	0,25
3	Resistenza convenzionale	0	5	25	45	1,5
4	Posizione edificio e fondazioni	0	5	25	45	0,75
5	Orizzontamenti	0	5	15	45	Var.
6	Configurazione planimetrica	0	5	25	45	0,5
7	configurazione in elevazione	0	5	25	45	Var.
8	Distanza max tra le murature	0	5	25	45	0,25
9	Copertura	0	15	25	45	Var.
10	Elementi non strutturali	0	0	25	45	0,25
11	Stato di fatto	0	5	25	45	1

Tabella 24 Indici c_v e pesi p_i utilizzati per la determinazione dell'indice di vulnerabilità I_v con la metodologia di 2° livello

L'indice di vulnerabilità è calcolato utilizzando l'espressione:

$$I_v = \sum_{i=1}^{11} c_{vi} p_i$$

E risulterà: $0 \leq I_v \leq 382.5$ oppure $0 \leq I_v \leq 100$ se normalizzato.

L'indice di vulnerabilità così calcolato non fornisce una valutazione assoluta del danno atteso per una data intensità sismica ma rappresenta solo una misura convenzionale della propensione al danneggiamento. La validazione di tale parametro avviene solo attraverso la correlazione con una misura del danno (d) e la severità del sisma (s).

4.3. Analogie di comportamento con le costruzioni in muratura

Nel paragrafo 2.3 si è descritto il comportamento meccanico del materiale terra cruda, mentre in quello precedente si sono descritti i meccanismi di collasso.

Dal punto di vista meccanico si può asserire che la terra, indipendentemente dalla tecnica di messa in opera, si configura come un materiale fragile con comportamento meccanico e legame costitutivo, in fase "e-

lastica”, simile a quello delle murature, anche se con una resistenza a compressione paragonabile a quella dei materiali lapidei più poveri, come ad esempio il tufo di media qualità od anche i mattoni forati di classe II (in genere con una resistenza più bassa di quella della terra).

Per quanto riguarda poi i meccanismi di collasso c'è evidentemente una stretta connessione tra quelli descritti nel paragrafo precedente per le costruzioni in terra e quelli che sono reperibili in letteratura per le costruzioni in muratura.

Le differenze fondamentali tra i due materiali sono che, dal punto di vista meccanico, la terra è dotata di una fase post-elastica caratterizzata da maggiore duttilità, e che il paramento murario sarà sì più omogeneo rispetto ad un paramento realizzato con mattoni cotti (la malta e gli adobe sono costituiti dallo stesso materiale) ma con una resistenza nominale inferiore, il che comporterà, nel caso di movimenti sussultori, fenomeni di schiacciamento più frequenti.

Dalle analogie tra i due materiali si è ritenuto possibile adoperare, per la valutazione della vulnerabilità delle costruzioni in terra, i metodi utilizzati normalmente per le costruzioni in muratura ed in particolare la metodologia di 2° livello su espota, opportunamente modificata in funzione delle caratteristiche delle costruzioni in terra. La scelta è ricaduta su questa metodologia perché oltre ad essere ormai ritenuta “robusta” per la valutazione della vulnerabilità delle costruzioni, rappresenta uno strumento di rilievo puntuale sugli edifici e può rappresentare, nel caso di un intervento di consolidamento, un valido canovaccio atto ad evidenziare le carenze strutturali dei manufatti.

4.4. Rilievo della vulnerabilità sismica di edifici in terra cruda: una proposta

La scheda di secondo livello per il rilievo della vulnerabilità sismica delle costruzioni in muratura è stata opportunamente modificata per adeguarla alle costruzioni in terra. Si è mantenuta inalterata la divisione in 11 parametri che hanno anche conservato la loro denominazione. È invece cambiata la loro caratterizzazione e quindi gli elementi che concorrono alla definizione delle classi di vulnerabilità, quattro per ogni parametro (A,B,C,D) ordinate per ordine crescente di vulnerabilità.

4.4.a. Caratterizzazione dei parametri e definizione delle classi di vulnerabilità

Parametro 1: tipo ed organizzazione del sistema resistente

In questo parametro, indipendentemente dalle caratteristiche qualitative dei paramenti murari, si valuta l'ammorsamento tra le pareti ortogonali e tutti quei fattori che garantiscono il comportamento scatolare della costruzione³⁹.

Si terrà pertanto conto di:

1. Presenza di cordoli di collegamento delle pareti o travi di bordo
2. Ammorsamento tra le pareti ortogonali
3. Omogeneità del paramento murario
4. Opportuno dimensionamento e proporzionamento del rapporto pieni su vuoti
5. Presenza di elementi capaci di trasmettere le sollecitazioni taglianti

Le classi saranno così individuate:

Classe A: Edifici con:

- Travi di bordo o cordoli opportunamente ancorati alla struttura verticale
- Pareti ortogonali ben ammorsate
- Presenza di rinforzi o armature all'intersezione dei muri
- Armatura orizzontale all'interno del paramento

Classe B: Edifici con:

- Travi di bordo o cordoli opportunamente ancorati alla struttura verticale
- Pareti ortogonali ben ammorsate

Classe B: Edifici con buon ammorsamento delle pareti ortogonali anche se privi di cordoli o travi di bordo

Classe C: Edifici con pareti ortogonali non opportunamente legate

³⁹ Per questo parametro, nella scheda del GNDT e per edifici già consolidati, si tiene conto della aderenza degli interventi alla normativa vigente. Nel caso delle costruzioni in terra, almeno in Italia, non è ancora stata stilata una normativa.

Parametro 2: qualità del sistema resistente

In questo parametro si tiene conto, dal punto di vista qualitativo, delle caratteristiche di resistenza della muratura in funzione del materiale e della tecnica di messa in opera e della omogeneità del paramento.

Classe A:

- Murature in adobe stabilizzato o in blocchi estrusi o in blocchi compressi con buona qualità delle malte⁴⁰, ben intessute ed omogenee.

N. B. la presenza in corrispondenza di aperture, angolari o pareti più esposte alle intemperie di murature di diversa natura non rappresenta un fattore di riduzione della omogeneità

- Murature in pisè stabilizzato con buona aderenza tra strati successivi di messa in opera ed omogeneità dell'impasto costipato meccanicamente.

Classe B:

- Murature in adobe stabilizzato formato con buona malta di allettamento ed omogeneità del paramento.
- Murature in pisè omogenee ottenute per compressione manuale.

Classe C:

- Murature in adobe formato, non stabilizzato, con omogeneità e regolarità del paramento murario.
- Murature in cob o adobe formato a mano con omogeneità e regolarità del paramento murario e buona malta di allettamento.
- Murature in pisè con scarsa aderenza tra strati successivi di messa in opera.

Classe D

- Murature in cob o adobe formato a mano con scarsa omogeneità.
- Murature a sacco con forti differenze tra la qualità del riempimento e la muratura esterna.
- Murature realizzate con le altre tecniche costruttive.

⁴⁰ Per buona malta di allettamento si intende una malta a base di terra con il giusto dosaggio di argilla e stabilizzata con materiali compatibili. Non è considerata buona una malta a base di materiali sintetici

Parametro 3: resistenza convenzionale

Vista la similitudine di comportamento tra le costruzioni in terra e quelle in muratura si è ritenuto possibile adoperare la stessa metodologia usata per le costruzioni in muratura, sostituendo ogni volta i valori di tensione limite a compressione e taglio quelli determinati per la tecnica costruttiva specifica⁴¹.

L'assegnazione della classe di vulnerabilità sarà effettuata in funzione di α inteso come rapporto tra C e C_0 , con C rappresentativo della resistenza a taglio dell'edificio e C_0 definito dalla normativa vigente per le murature:

- Classe A - Edifici con $\alpha \geq 1$
- Classe B - Edifici con $0.6 \leq \alpha < 1$
- Classe C - Edifici con $0.4 \leq \alpha < 0.6$
- Classe D - Edifici con $\alpha < 0.4$

Parametro 4: posizione dell'edificio e fondazione

Si vuole valutare, con questo parametro, l'influenza del terreno e delle fondazioni sul comportamento globale della costruzione.

Per quanto riguarda il terreno si terrà conto della sua pendenza e della sua qualità.; per le fondazioni, invece della loro presenza, della profondità, dell'ammorsamento con le strutture superiori.

Per il terreno i fattori significativi sono:

- Dislivello max tra due punti sulle direzioni principali dell'edificio: Δh
- Qualità del terreno: roccioso o terreno sciolto che a sua volta sarà distinto in terreno sciolto non spingente (laddove vi siano degli elementi di contenimento delle spinte effettivi) o terreno sciolto spingente
- Pendenze del terreno: p

Per quanto riguarda invece la qualità delle fondazioni, i parametri saranno:

1. Presenza delle fondazioni
2. Altezza delle fondazioni: H
3. Ammorsamento tra fondazioni e muratura.

⁴¹ In appendice si riporta un metodo semplificato per il calcolo della resistenza convenzionale.

Dalla tabella seguente si stabilirà il tipo di fondazioni

	H>40mm	H<40mm	
PRESENZA DELLE FONDAZIONI	1	2	AMMORSAMENTO BUONO (presenza di armature verticali e simili) SCARSO AMMORSAMENTO
	2	3	
ASSENZA DI FONDAZIONI	4		

Tabella 25

Non sempre è possibile avere notizie sicure in merito alle fondazioni, perché non visibili con n rilievo sommario. In mancanza di teli notizie e della possibilità di effettuare dei saggi, si assegnerà alle fondazioni il tipo 4.

Dalla tabella successiva si assegnerà poi la classe al parametro.

Tipo di terreno	Tipo di fondazione			
	1	2	3	4
Roccioso P<10% Δh=qualsiasi	A	A	A	B
Roccioso 10%<P<30%	A	B	C	C
Roccioso 30%<P<50%	B	C	C	D
Roccioso P>50% Δh=qualsiasi	C	D	D	D
Sciolto non spingente P?10 Δh=0	A	A	A	B
Sciolto non spingente P?10 0<Δh?1	B	B	B	B
Sciolto non spingente 10<P<30 0<Δh?1	B	B	B	C
Sciolto non spingente 30<P<50 0<Δh?1	C	C	C	C
Sciolto non spingente P>50 Δh qualsiasi	D	D	D	D
Sciolto spingente P?30 Δh?1	C	C	C	C
Sciolto spingente 30<P<50 Δh?1	C	C	D	D
Sciolto spingente P>50 Δh qualsiasi	D	D	D	D
Sciolto spingente P qualsiasi Δh?1	D	D	D	D

Tabella 26

Parametro 5: orizzontamenti

Si vuole valutare il comportamento del solaio nel proprio piano e i collegamenti con le pareti portanti. La valutazione sarà effettuata compilando la tabella seguente, considerando come indice la somma degli indici associati ai singoli elementi di riga riscontrabili nella costruzione, ad ognuno dei quali è associato un coefficiente.

		Parametri di valutazione			indice	peso	ci
Qualità del solaio	Struttura principale	A: travi in legno appropriato, ben dimensionate e lavorate i=100	B: travi in legno rudimentali o di scarsa qualità meccanica i=70	C: travi in acciaio i=150		1	
	Struttura secondaria	A: presenza di una struttura secondaria ben organizzata e di materiale appropriato i=100	B: struttura secondaria realizzata in materiali leggeri (ad esempio stuoie o canne) i=50	C: assenza di una struttura secondaria i=0		0,8	
	Impalcato	A: battuto di terra i=30	B: materiale alleggerito i=50	C: soletta in cls i=100		0,7	
Geometria del solaio		A: presenza di piani sfalzati i=20	B: interasse struttura inferiore a 3m i=100, interasse compreso tra 3m e 4,5m i=80, interasse maggiore di 4,5m i=50	C: omogeneità delle caratteristiche geometriche i=20		0,8	
Collegamento murature portanti-solaio		A: travi che poggiano direttamente sulle pareti i=20	B: presenza di cuscinetti in mattoni i=50	C: presenza di travi di bordo i=100		1	
						$C_i = \sum c_i$	

Tabella 27

Le classi di vulnerabilità saranno così definite:

- Classe A: $c_i > 395$
- Classe B: $395 < c_i < 365$
- Classe C: $365 < c_i < 245$
- Classe D: $c_i > 245$

Parametro 6: configurazione planimetrica

Le prestazioni sismiche di un edificio dipendono dalla sua forma in pianta che ne condiziona il “modo di vibrare”. Nei manuali è possibile ritrovare riferimenti a questo problema con indicazioni elementari sulla forma dell'edificio (fig. 70).

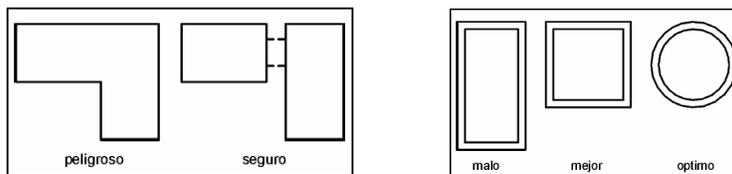


Fig. 70 Forme in pianta di edifici in terra da Minke G. (2001)

L'assegnazione della classe di vulnerabilità sarà fatta in funzione della forma e dei rapporti β_1 e β_2 ottenuti da:

$$\beta_1 = \frac{a}{l} \cdot 100 \quad \beta_2 = \frac{b}{l} \cdot 100$$

Con:

l=lunghezza in pianta del manufatto

a=profondità

b=lunghezza dello sporto maggiore

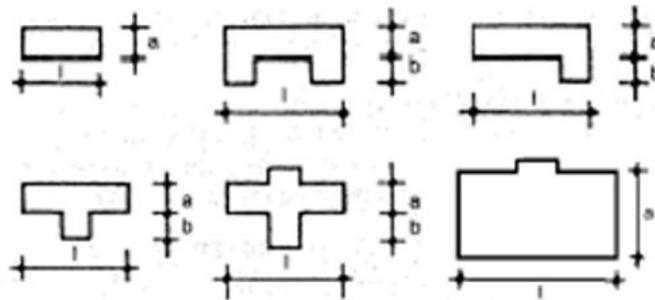


Fig. 71 Schemi di pianta (Manuale per la compilazione della Scheda GNDT/CNR di II livello. Versione modificata dalla Regione Toscana, pag. 59)

Le classi di vulnerabilità saranno così definite:

- Classe A: pianta circolare o rettangolare con rapporto $80 \leq \beta_1 < 100$
- Classe B: pianta rettangolare con rapporto $60 \leq \beta_1 < 80$, altre forme con $\beta_2 \leq 20$
- Classe C: qualsiasi forma con $40 \leq \beta_1 < 60$; $20 < \beta_2 \leq 30$
- Classe D: qualsiasi forma con $\beta_1 < 40$; $\beta_2 > 30$

Parametro 7: configurazione in elevazione

In questo parametro si valutano le variazioni di massa in elevazione e si terrà pertanto conto dei seguenti parametri:

- presenza di porticati
- presenza di torri
- variazioni della massa in elevazione significative e non graduali

Detti:

1. ΔM la variazione di massa fra due piani successivi (con il segno + se si tratta di aumento, con il segno - se si tratta di diminuzione)
2. M la massa del piano inferiore.

La variazione di massa sarà valutata in funzione del rapporto $\lambda = \Delta M / M$ (in percentuale), e le classi saranno assegnate in funzione del coefficiente λ , nel modo seguente:

- Classe A: Edifici omogenei con $\lambda < 10\%$
- Classe B: Edifici con porticati con $\lambda < 10\%$; Edifici omogenei con $10\% < \lambda < 20\%$; Edifici con torrette con un'altezza libera inferiore al 10% dell'altezza totale dell'edificio
- Classe C: Edifici con porticati con $10\% < \lambda < 20\%$; Edifici omogenei con $\lambda > 20\%$; Edifici con torrette con un'altezza libera superiore al 10% ed inferiore o eguale al 40% dell'altezza totale dell'edificio
- Classe D: Edifici con porticati con $\lambda > 20\%$; Edifici con torrette con un'altezza libera superiore al 40% dell'altezza totale dell'edificio.

Parametro 8: distanza massima fra le murature

Si tiene conto dell'efficacia di controvento svolta dai muri trasversali e la valutazione è fatta in funzione del coefficiente γ dato da:

$$\gamma = \frac{i}{s}$$

Con:

- i = interasse tra le pareti trasversali o di spina;
- s = spessore del muro maestro.

Le classi di vulnerabilità sono così definite:

- Classe A: $\gamma < 15$
- Classe B: $15 < \gamma < 18$
- Classe C: $18 < \gamma < 25$
- Classe D: $\gamma > 25$

Parametro 9: copertura

Si tiene conto della tipologia e del peso delle coperture, ed in particolare di:

- effetto spingente della copertura
- materiale da cui è costituita
- presenza di cordoli o catene

Le classi di vulnerabilità saranno così definite:

- Classe A: coperture a tetto non spingenti dotate di catene o a capriata; coperture a volta realizzate con materiali leggeri (quincha)
- Classe B: coperture a tetto non spingenti prive di catene o cordoli; coperture a tetto poco spingenti con catene o cordoli; coperture a volta o cupola poco spingenti dotate di cordolo o catene
- Classe C: coperture a tetto poco spingenti prive di catene o cordoli; coperture a tetto spingenti con catene o cordoli; coperture a volta o cupola poco spingenti prive di cordolo o catene
- Classe D: coperture a tetto spingenti prive di catene o cordoli; coperture a volta o cupola prive di cordolo o catene

Parametro 10: elementi non strutturali

Valuta l'effetto del crollo di eventuali elementi non strutturali. Le classi sono così definite:

- Classe A: edifici privi di appendici o aggetti esterni
- Classe B: edifici con infissi ben collegati alle pareti, con comignoli di piccole dimensioni e di peso modesto; edifici con balconi costituenti parte integrante delle strutture degli orizzontamenti.
- Classe C: edifici con infissi esterni o insegne di piccole dimensioni mal vincolate alle pareti
- Classe D: edifici che presentano comignoli o altre appendici in copertura mal vincolate alla struttura, parapetti di cattiva esecuzione o altri elementi di peso significativo che possono crollare in caso di terremoto; edifici con balconi o altri aggetti (servizi, ecc.) aggiunti in epoca successiva alla costruzione della struttura principale e ad essa collegati in modo sommario.

Parametro 11: stato di fatto

Si valuta lo stato di conservazione dei manufatti e la presenza degli opportuni accorgimenti tesi a conservarlo. Da notare che la durabilità degli edifici in terra è uno dei problemi principali di questo tipo di costruzioni. La presenza di un buon intonaco, di un basamento opportuno e di coperture sufficientemente sporgenti, ne assicurano una migliore conservazione. Particolare cura e conoscenza dovrà essere adoperata nel valutare questo parametro che fortemente influisce sul comportamento meccanico di questo tipo di costruzione.

Le classi di vulnerabilità saranno così definite:

- Classe A: edifici in buono stato di conservazione ed eseguiti ad opera d'arte.
- Classe B: edifici in buono stato di conservazione e che siano manchevoli di almeno uno degli accorgimenti descritti; edifici che presentano lesioni capillari non diffuse, ad eccezione di casi in cui queste siano state prodotte da terremoti, anche se eseguiti ad opera d'arte.
- Classe C: edifici con lesioni di media entità (ampiezza della lesione: 2-3 mm) o con lesioni capillari di origine sismica; edifici che, pur non presentando lesioni, sono caratterizzati da uno stato di conservazione delle murature tale da determinare una significativa diminuzione di resistenza.
- Classe D: edifici che presentano pareti fuori piombo e/o lesioni gravi; edifici caratterizzati da grave deterioramento dei materiali o da infestazioni animali o vegetali; edifici che, pur non presentando lesioni, sono caratterizzati da uno stato di conservazione delle murature tale da determinare una grave diminuzione di resistenza.

4.4.b. Attribuzione dei coefficienti c_{vi} e dei pesi p_i

Avendo lasciato invariata la struttura della scheda nell'attribuzione dei coefficienti e dei pesi si è partiti da quelli comunemente utilizzati per le costruzioni in muratura. I valori attribuiti a questi indici sono rimasti sostanzialmente invariati eccetto che, per quanto riguarda i coefficienti, quelli relativi al primo e al secondo parametro e, per quanto riguarda i

pesi, quelli cui non è associato un valore comunemente riconosciuto, si sono attestati sul valore più alto.

Per i parametri 1 (tipo ed organizzazione del sistema resistente) e 2 (qualità del sistema resistente), tenuto conto delle caratteristiche meccaniche del materiale, si è ritenuto opportuno apportare delle modifiche in senso peggiorativo.

CLASSI PARAMETRI	A	B	C	D	PESI
1	0	5	20	45	1
2	0	5	25	45	0,25
3	0	5	25	45	1,5
4	0	5	25	45	0,75
5	0	5	15	45	VAR
6	0	5	25	45	0,5
7	0	5	25	45	VAR
8	0	5	25	45	0,25
9	0	15	25	45	VAR
10	0	0	25	45	0,25
11	0	5	25	45	1

Tabella 28 Valori dei coefficienti e dei pesi per le costruzioni in muratura

CLASSI PARAMETRI	A	B	C	D	PESI
1	5	15	25	45	1
2	5	15	25	45	0,25
3	0	5	25	45	1,5
4	0	5	25	45	0,75
5	0	5	15	45	0,5
6	0	5	25	45	0,5
7	0	5	25	45	1
8	0	5	25	45	0,25
9	0	15	25	45	0,5
10	0	0	25	45	0,25
11	0	5	25	45	1

Tabella 29 Valori dei coefficienti e dei pesi per le costruzioni in terra cruda

Per quanto riguarda il primo parametro, nel valutare i collegamenti tra le pareti, ed in particolare la presenza di cordoli o catene, non si può fare riferimento ad una normativa o ad una tecnica consolidata, pertanto anche in presenza di questi elementi non si può mai valutare la loro completa efficacia. Da ciò lo slittamento verso l'alto dei coefficienti. Per quanto riguarda invece il secondo parametro, tenuto conto che, nella definizione delle classi di vulnerabilità delle costruzioni per la scala MSK-76, le costruzioni in terra sono incluse prevalentemente nella classe a più alta vulnerabilità (tab. 12, pag. 102), e al massimo in quella successiva, si è ritenuto opportuno considerare, a confronto con

lo stesso parametro delle costruzioni in muratura, un lieve slittamento delle classi di vulnerabilità, seguendo la logica degli insiemi sfumati. Per quanto riguarda i pesi invece, la mancanza di un campione di studio sufficientemente ampio e la validazione dei risultati ottenuti attraverso l'utilizzo della scheda così costruita con metodi meccanici o con la determinazione del danno con la sezione 8 della scheda di 1° livello, ha fatto ritenere validi i pesi già utilizzati per le costruzioni in muratura.

Bibliografia

- I SIACOT. Seminario Ibero-Americano de Construcao com terra. Salvador 2002 ANAIS*
AA.VV., 2003, *Construcao com terra Salvador 2002. catalogo de la exposicion*, Ed. C. Martins Neves, Brasile
- AA.VV., *Nuevas casas resistentes de Adobe*, PUCP (Manuale di costruzione).
- Acevedo J. D., Villarreal H. M., Trejo M. A., García P. C., 2005, *Sistema autoconstructivo muro de tierra-concreto, aplicado en la región sureste de coahuila: equidad de género*, in Terra em seminario, atti IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, III Seminário Architecture de Terra em Portugal, Edizione ARGUMENTUM.
- Achenza M, Sanna A., 1999, *Abitare la terra*, Atti del convegno Villamassargia 12-14 novembre 1998, CUEC, Cagliari
- Achenza M., 1996, *Elementi di base per una corretta identificazione delle terre per adobe*, Cagliari, ed. CUEC-Cooperativa Universitaria Editori.
- Achenza M., 1997, *Tre cantieri a confronto*, Informazione. Periodico dell'Ordine degli ingegneri della Provincia di Cagliari, 76, gennaio/febbraio 1997.
- Achenza M, Bertagnin M., Bollini G., Bonato V., Siviero E., 1998, *Prove di accettazione per il mattone in terra cruda: il caso della Sardegna*, in 12° Congresso C.T.E. (Atti del convegno, Padova 5-6-7 novembre 1998).
- Achenza M., 1999, *Aggiornare si può. Aggiornare conviene*, Bioarchitettura, 13, febbraio 1999.
- Adams B. J., Huyck C: K., Mio M., Cho S., Ghosh S., Chi Chung H., Educhi R. T., Houshmand B., Shinozuka M., Mansouri B., 2004, *the Bam (Iran) earthquake of December 26, 2003: Preliminary reconnaissance using remotely sensed data and VIEWS (Visualising the Impacts of Earthquakes with Satellite Images) System*
- Ahmadizadeh M., Shakib H., 2004, *On the December 26, 2003, south-eastern Iran earthquake in Bam region*, in Engineering Structures, [on line] <http://elsevier.com/locate/engstruct>

- Atzeni C., Massidda L., Sanna U., 1993, *Technological properties of earth-based construction materials treated with hydraulic cement or acrylic polymer*, in Terra '93, 7° Conferencia internacional sobre o estudo e conservação da arquitectura de terra, D.G.E.M.N. (Atti della conferenza internazionale, Silves, Portogallo, ottobre 1993) Lisbona, Edizioni DGEMN, pp. 564-568.
- Atzeni C., massidda L., sanna U., 1996, *Proprietà tecnologiche di materiali a base di terra cruda. Dalla tradizione all'innovazione*, in F. Storelli (a cura di), Habitat e architetture in terra. Le potenzialità delle culture costruttive (Atti del convegno internazionale - seminario di studi, Roma, 2-3 dicembre 1994) Roma, Gangemi Editore, pp. 163-168.
- Atzeni C., Cabiddu M. G., Massidda L., Sanna U., 1996, *The use of "stabilized earth" in the conservation of megalithic monuments*, Conservation and Management of Archaeological Sites, 1, pp. 161-168.
- Baiocco F., 2003, *Considerazioni sulle prestazioni meccaniche del materiale terra cruda: la sicurezza sismica*, in La costruzione in terra cruda in Italia: verso una normativa nazionale, in Bollini G. e Lion M. (a cura di), Edizione EDITORIALE ECO.
- Baldacci O., 1958, *l'ambiente geografico della casa in terra cruda in Italia*, in Rivista geografica italiana vol LXV anno LXV, La nuova Italia, Firenze
- Balderrama A. A. A., 2001, *The conservation of earthen architecture*, The GCI Newsletter, vol. 18
- Balderrama A. A. A., Alberini C., 2003, *Relazione per l'audizione informale* presso l'VIII Commissione Permanente (Ambiente, Territorio e Lavori pubblici) nell'ambito dell'esame della proposta di legge C.2347 e C.4019 (Provvedimenti per le costruzioni in terra cruda)
- Baradan B., 1993, *Preservation of adobe walls*, in Tierra '93, atti 7° Conferencia internacional sobre o estudo conservação ad arquitectura de terra, ed DGEMN, Lisboa.
- Bariola J., Blondet M., Torrealva D., Vargas J., 2005, *Dynamic Behavior of Adobe dwellings*, in atti Sismoadobe 2005.
- Battistelle G. R. A., Borges Faria O., 2005, *Aproveitamento do lodo residual do processo de fabricação de celulose e papel em tijolos de terra-crua*, in Terra em seminario, atti IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, III Seminário Architecture de Terra em Portugal, Edizione ARGUMENTUM.

- Bertagnin M., 1982, *Algeri: autocostruzione e recupero dell'habitat marginale*, in M. Bertagnin et alii, *Autocostruzione oggi*, Bologna, Edizioni Ente Fiere di Bologna, pp. 40-51.
- Bertagnin M., 1982, *Centralità delle forme di sottointegrazione urbana nel Maghreb*, in R. Costa (a cura di), *Metodi e risultati di ricerche svolte nella facoltà di ingegneria nell'ambito delle discipline architettoniche*, Istituto di Architettura e Urbanistica dell'Università di Trieste, Trieste, pp.155-164.
- Bertagnin M., 1983, *Costruire con il fango*, Spazio & Società, 24, pp. 118-125.
- Bertagnin M., 1984, *Tecnologie appropriate e risparmio energetico: costruire in terra cruda nei paesi industrializzati*, *Identità*, anno III, 4, pp. 62-75.
- Bertagnin M., 1985, *Le tecnologie costruttive e i comportamenti termici delle case di terra*, in M. Morandi e F. Profico (a cura di), *Le case di terra. Memoria e realtà*, (Catalogo della mostra) Pescara, C.L.U.A. Editrice, pp. 7-10.
- Bertagnin M., 1986, *Tunisia: tecnologia per lo sviluppo, cooperazione e recupero dell'habitat spontaneo* in *Tecnologie per lo sviluppo: Africa*, Bologna, Edizioni Ente Fiere di Bologna, pp. 187-194.
- Bertagnin M., 1986, *Un quartiere di terra*, Spazio & Società, 35, pp. 68-74.
- Bertagnin M., 1986, *Il degrado dell'habitat vernacolare in terra cruda: esperienza di ricerca in Algeria e in Italia*, in *Manutenzione e conservazione del costruito fra tradizione e innovazione*, (Atti del convegno, Bressanone 1986) Padova, Libreria Progetto Editore, pp. 265-273.
- Bertagnin M., 1987, *Algerie: Lecture de l'habitat traditionnel en terre crue*, CEAA-Terre, EAG editions, Grenoble, pp. 23-51.
- Bertagnin M., 1987, *Technologie et typologie de la maison en terre crue en Italie (Nord-Centre)*, CEAA-Terre EAG editions, Grenoble, pp. 1-27.
- Bertagnin M., 1987, *Casa a basso costo e qualità architettonica la "Maison 24 heures" nell'anno dell'alloggio per i senza casa*, in *La qualità architettonica dello spazio costruito* (Atti del convegno, Napoli, 9-10 ottobre 1987, Università degli studi di Napoli Federico II, Istituto di Architettura tecnica) Napoli, Editrice CUEN, 1, pp. 511-521.
- Bertagnin M., 1987, *Insedimenti provvisori e interventi di emergenza nei paesi in via di sviluppo*, in 2° Congresso Nazionale dell'Area della

- Produzione Edilizia (Atti del convegno) CNR, Ancona, IV, pp. 143-166.
- Bertagnin M., 1987, *L'architecture de le terre en Italie: connaissance et réhabilitation d'un patrimoine typologique et technologique meconnu*, in *Le patrimoine europeen construit en terre et sa rehabilitation* (Atti dei colloqui) MELATT-Entpe, Lyon, pp. 219-253.
- Bertagnin M., 1987, *Tecnologie e materiali locali per uno sviluppo appropriato: il caso della terra cruda*, in *Sviluppo e tradizione* (Atti del seminario, Università degli studi di Trieste, Istituto di architettura e urbanistica, giugno 1986) pp. 5-24.
- Bertagnin M., CRATerre, 1988, *Architecture de terre* in *Les Carnets de la Recherche Architecturale: les produits de la Recherche*, Presse Ecole d'Architecture de Grenoble, 2, pp. 107-127.
- Bertagnin M., 1988, *Sperimentazione di coperture appropriate ai paesi in via di sviluppo presso il Politecnico di Milano. La volta nubiana e La volta tunisina*, in G. Scudo e L. Morfini (a cura di), *Materiali, clima e costruzione. Tecniche esecutive congruenti ai contesti a clima caldo-arido del continente africano*, Milano, CLUP editrice, pp. 146-157 e 184-191.
- Bertagnin M., 1988, *Conoscere e recuperare l'architettura di terra: i risultati di due recenti convegni internazionali*, *Recuperare*, edilizia design, impianti, 36, pp. 433-445.
- Bertagnin M., 1988, *La maison pour demain e le case del futuro tra domotica e habitat intelligente a HABITER 1988*, *Parametro*, 167, pp. 26-31.
- Bertagnin M., 1992, *Scuole di terra. CRATerre in Burkina Faso*, *Spazio & Società*, 57, pp. 90-99.
- Bertagnin M., 1992, *Il pisé e la regola. Manualistica settecentesca per l'architettura in terra*, Roma, EdilStampa.
- Bertagnin M., CRATerre, 1993, *Recherche et Développement-Laboratoire CRATerre EAG* in *Architecture et cultures constructives, éléments pour un pole d'enseignement de la construction*, Unité Architecture pour l'éducation de l'UNESCO.
- Bertagnin M., 1993, *Bioedilizia. A qualcuno piace cruda*, *La Nuova Ecologia*, 2, pp. 42-45.
- Bertagnin M., 1994, *Il valore della riscoperta della sapienza tecnologica vernacolare del costruire in terra*, in G. COSSU (a cura di), *Su Ladiri de Samassi*, scheda tecnica sul processo tradizionale di fabbrica-

zione del mattone crudo in un'area del Campidano centro-occidentale, Cagliari, CUEC, pp. 1-2.

Bertagnin M., 1995, *Costruzioni in terra cruda: manualistica ed esperienze didattiche* (Collana: Esiti -Quaderni della scuola di specializzazione in tecnologia, architettura e città nei paesi in via di sviluppo, 7, Dipartimento Casa-Città, Politecnico di Torino) Torino, CLUT Editrice.

Bertagnin M., 1996, *Bioedilizia: progettare e costruire in modo ecologicamente consapevole*, Padova, Edizioni GB.

Bertagnin M., 1996, *Costruire in terra cruda*, in S. OMODEO SALÉ (a cura di), *Architettura, Design & Natura: progettare la sostenibilità*, Milano, Nuove Iniziative, pp. 91-94.

Bertagnin M., Achenza M., Mungiguerra C., 1999, *Architetture di terra in Italia. Tipologie, tecnologie e culture costruttive*, Monfalcone (GO), Edicom Edizioni.

Bertagnin M., 2001, *RED-Recycled Domus: un progetto per la sostenibilità*, in C. Monti e R. Roda (a cura di), *Costruire sostenibile: il Mediterraneo*, Fiere internazionali di Bologna – SAIE 2001, Firenze, Alinea, pp. 268-275.

Bertagnin M., 1988, *Formazione e perfezionamento dei docenti universitari nelle discipline progettuali. Note per la costruzione di approccio appropriato alla realtà dei paesi in sviluppo*, in *Formazione dei docenti universitari dei Paesi in Via di Sviluppo nelle discipline dell'architettura* (Atti del convegno, Roma, 1988) pp. 31-94.

Bertagnin M., 1988, *Insedimenti fortificati tradizionali e coloniali nel disegno della città algerina tra recupero e nuova identità*, in *Castelli e città fortificate, storia, recupero, valorizzazione* (Atti dei colloqui internazionali, Palmanova, 12-13 giugno 1987), Udine, Università degli studi di Udine, Istituto di Urbanistica e Pianificazione, pp. 249-278.

Bertagnin M., 1988, *Il casone di terra: un tipo edilizio in via di estinzione*, in A. Calderazzi (a cura di), *L'Architettura rurale nelle trasformazioni del territorio in Italia* (Atti del convegno nazionale, Università di Bari, 15-16 maggio 1987).

Bertagnin M., 1989, *Materiali, forma e clima, programmi di formazione, progetti e tipi edilizi appropriati per l'ottimizzazione delle risorse locali in aree caldo aride dei PVS*, in *Energia, Ambiente y Innovacion Tecnologica*, Caracas (proceedings) 3, pp. 1099-1104.

Bertagnin M., 1990, *Dell'economica costruzione delle case di terra. L'importanza di un manuale per la diffusione di un modo di costruire*, in M. Casciato et alii (a cura di), *Il modo di costruire: 150 anni di costruzione edile in Italia* (Atti del seminario internazionale, Roma, 6-8 giugno 1988), Roma, EdilStampa editore, pp. 81-91.

Bertagnin M., 1990, *L'altra metà logica delle vecchie tecnologie: algoritmi del disegno e autorecupero del pueblo di Taos*, in *Gli algoritmi del disegno* (Atti del convegno, Cividale del Friuli, 9-10 novembre 1990) Istituto di Urbanistica e Pianificazione, Università di Udine, pp.262-271.

Bertagnin M., 1991, *Costruire in terra: didattica, manualistica e recenti architetture per un nuovo approccio al costruire*, in *Architettura bioecologica* (Atti del primo convegno nazionale sul costruire bioecologico, Udine, 31 marzo 1990) Monfalcone (GO), Edicom edizioni, pp.127-132 (terza edizione 1996).

Bertagnin M., 1991, *Le mutazioni dell'habitat in Sardegna: azioni e ricerche per una nuova cultura del recupero dell'architettura di terra dei Campidani*, in *Le mutazioni dell'habitat, una nuova cultura del recupero* (Atti del convegno, Università degli studi di Napoli Federico II, Istituto di Architettura tecnica) Napoli, Editrice CUEN, pp. 49-60.

Bertagnin M., 1992, *Il muro formaceo. Attualità di un progenitore del conglomerato cementizio*, in A. de Marco e R. Iovino (a cura di), *La trasmissione delle idee dell'architettura. Conglomerati: dalla Tecnologia all'Architettura* (Post acta - scritti in onore di Pasquale D'Elia) Udine, Istituto di Urbanistica e Pianificazione, Università degli studi di Udine, pp. 271-300.

Bertagnin M., Mattiussi A., 1992, *Acqua, terra ed aria: la tecnologia dell'architettura vernacolare nell'opera di Hassan Fathy*, in *La figura e l'opera di Hassan Fathy* (Catalogo della mostra) Accademia d'Egitto, Roma, pp. 14-15.

Bertagnin M., 1993, *De Cointeraux à Del Rosso: de la diffusion de la pensée technologique à la recherche des dernières témoignages d'architecture en pisé de Toscane*, in *Terra '93, 7° Conferencia internacional sobre o estudo e conservaço da arquitectura de terra*, D.G.E.M.N. (Atti della conferenza internazionale, Silves, Portogallo, ottobre 1993) Lisbona, Edizioni DGEMN, pp. 153-158.

Bertagnin M., 1994, *La recente ricerca sull'architettura in terra in Italia: un quadro di riferimento disciplinare tra tipologia, tecnologia e*

- patologie edilizie*, in A. SANNA (a cura di.), *Architetture in terra. Tipologie, tecnologie, progetto* (Atti del seminario, Quartu Sant'Elena, 26 giugno 1990) Cagliari, CUEC, pp. 85-88.
- Bertagnin M., 1994, *La terra, un materiale per l'architettura nel presente di una tradizione millenaria*, in *Architectura et Natura* (Catalogo della mostra) Milano, Mazzotta editore, pp. 84-89.
- Bertagnin M., 1994, *Osservazioni sull'uso della terra nelle fortificazioni: le fortezze di terreno nell'esperienza degli ingegneri militari da Savorgnan a Vauban*, in A. de MARCO (a cura di), *Castelli e città fortificate: Palma La Nuova 400° (1593-1993)*, (Atti del convegno) Università di Udine-Comune di Palmanova, pp. 438-447.
- Bertagnin M., 1995, *Architetture di terra: ecologia del costruire e dell'abitare*, in *Dalle case di terra all'architettura bioecologica* (Catalogo della mostra) Macerata, pp. 40-42.
- Bertagnin M., 1996, *Costruire in terra, costruire ecologico; sperimentazione ed esperienze formative*, in F. Storelli (a cura di), *Habitat e architetture in terra. Le potenzialità delle culture costruttive* (Atti del convegno internazionale - seminario di studi, Roma, 2-3 dicembre 1994) Roma, Gangemi Editore, pp. 117-124.
- Bertagnin M., 1998, *Recientes experiencias didácticas y de investigación sobre el adobe*, in *Arcquitectura de tierra. Encuentros Internacionales Centro de Investigación Navapalos* (Atti del convegno), Madrid, Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones, pp. 45-51.
- Bertagnin M., 1999, *Presentazione delle tematiche dedicate alla normativa*, in A. Sanna, M. Achenza (a cura di), *Abitare la terra* (Atti del convegno, Villamassargia – Samassi, 12-15 novembre 1998) Cagliari, CUEC Editrice, pp. 49-50.
- Bertagnin M., 2000, *Earthen Architecture in Italy: Types, Technologies and Building Cultures*, in *TERRA 2000*, 8th International conference on study and conservation of earthen architecture, English Heritage / ICOMOS Preprints, Torquay, pp. 379-382.
- Biasutti R., 1926, *Per lo studio dell'abitazione rurale in Italia*, *Rivista Geografica italiana* anno XXXIII Fasc.I-II gennaio-febbraio 1926, Firenze.
- Binici H., Aksogan O., Shah T., 2005, *Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material*, in *Construction and building materials* n° 19, [on line] <http://www.elsevier.com/locate/conbuildmat>.

- Blondet M., Ginocchio F., Villa García G, Torrealva D., Madueño I., *Using Industrial Materials for the Construction of Safe Adobe Houses in Seismic Areas*.
- Blondet M., Torrealva D., Villa Garcia G., 2002, *Adobe in Perù: tradition, Reserch and Future*, in Modern Earth Building 2002-International Conference and fair 19 to 21th of April, Berlin.
- Blondet M., Vargas J., Tarque N., 2005, *Reflexiones sobre la normatividad para la consrtucción sismorresistente de edificaciones de adobe*, in atti Sismoadobe 2005.
- Blondet M., Villa Garcia G. M., Brzev S., *Earthquake-Resistant Construction of Adobe Buildings : A tutorial*.
- Bollini G., Bonato V., 1999, *Normativa tecnica per la costruzione in terra cruda (làdiri) in Sardegna: prime ipotesi*, in A. Sanna, M. Achenza (a cura di), *Abitare la terra* (Atti del convegno, Villamassargia – Samassi, 12-15 novembre 1998) Cagliari, CUEC Editrice, pp. 77-84.
- Bollini G. (a cura di), 2002, *La ricerca universitaria sull'architettura di terra. Universiterra 1*, Collana Documenti di Architettura sostenibile, EdicomEdizioni, Monfalcone (GO)
- Briccoli Bati S., Ranocchiali G., 1996, *Costruzioni in terra cruda in Toscana*, in *Costruire con terra cruda* (Atti del convegno) Merano.
- Briccoli Bati S., Ranocchiali G., 1997, *Le tecniche costruttive della terra cruda in Toscana, Calabria e Sardegna*, in G. Scudo e S. Sabbadini (a cura di), *Le regioni dell'architettura in terra*, Rimini, Maggioli Editore, pp. 113-127.
- Briccoli Bati S., Ranocchiali G., Rovero L., 1999, *Additivi naturali per il miglioramento delle proprietà meccaniche e della durabilità del materiale da costruzione terra cruda*, in A. Sanna, M. Achenza (a cura di), *Abitare la terra* (Atti del convegno, Villamassargia – Samassi, 12-15 novembre 1998) Cagliari, CUEC Editrice, pp.71-76.
- Briccoli Bati S., Rovero L., 1999, *Materiali e tecniche per il recupero delle costruzioni in adobe*, in *Materiali e tecniche per il restauro* (Atti del convegno, Cassino, Frosinone, ottobre 1999).
- Briccoli Bati S., Rovero L., 2000, *Additivi naturali per il miglioramento delle proprietà meccaniche e della durabilità del materiale da costruzione terra cruda*, in V AIMAT, Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana d'Ingegneria dei Materiali, Spoleto.

- Briccoli Bati S., Rovero L., 2001, *Natural additives for improving the mechanical properties and durability of adobe building material*, 3, [12], Mats. Eng. Journal del 2001.
- Briccoli Bati S., 2001, *Terra: tecniche costruttive e caratteristiche meccaniche del materiale e delle strutture*, in *Costruzioni ed uso della terra*, Forlani M.C. (a cura di), Edizione MAGGIOLI, Repubblica di San Marino.
- Briccoli Bati S., 2003, *Caratteristiche meccaniche del materiale da costruzione terra cruda*, in *La costruzione in terra cruda in Italia: verso una normativa nazionale*, Bollini G. e Lion M. (a cura di), Edizione EDITORIALE ECO.
- Briccoli Bati S., 2004, *Comportamento meccanico del materiale da costruzione terra cruda e di modelli in scala di elementi murari in adobe*, in *La costruzione in terra cruda in Italia: verso una normativa nazionale*, Bollini G, Lion M. ed Achenza M. (a cura di), Edizione EDITORIALE ECO.
- Bruno P., 2005, *Contributo Para o estrudo e a Conservação de mura-cha islamica de Juromenha*, in *Terra em seminario, atti IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, III Seminário Architecture de Terra em Portugal*, Edizione ARGUMENTUM.
- Buti A., 1998, *Una lettura strutturale dell'architettura in terra del basso Piemonte*, in *Recupero & Conservazione*, 24, Milano, De Lettera editore.
- Calla Garcia A., 1996, *Arquitectura en tierra. Seminario-esposición*, La Paz, Bolivia
- Campisi V., Scudo G., 1993, *Metodi semplificati per l'analisi e la conoscenza del materiale terra*, in B. Bottero (a cura di), *Progettare e costruire nella complessità*, Napoli, Liguori.
- Casari S., 1997, *Il recupero degli edifici in terra cruda*, *Ambiente Costruito*, 2, Maggioli Editore, pp.59-60.
- Castillo B. G., 2005, *Nueva intervención en pueblos históricos*, in *Terra em seminario, atti IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, III Seminário Architecture de Terra em Portugal*, Edizione ARGUMENTUM.
- Cavalcanti O., Chimirri R., 1999, *Di fango, di paglia ... Architettura in terra cruda in Calabria*, Soveria Mannelli (CZ), Rubbettino.
- Cerruti D., Leoncini C., Maspero M., 1993, *Edificies en terre crue du bas Piémont: une idée pour une restauration correcte*, in *Terra '93*, 7°

- Conferencia internacional sobre o estudo e conservaço da arquitectura de terra, D.G.E.M.N. (Atti della conferenza internazionale, Silves, Portogallo, ottobre 1993) Lisbona, Edizioni DGEMN, pp.417-421.
- Cirvini S. A., Gomez Voltan J. A., 2005, *Patrimonio Arquitectónico de tierra en àrea sísmica-el caso de la región de Cuyo-Argentina*, in Terra em seminario, atti IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, III Seminário Architecture de Terra em Portugal, Edizione ARGUMENTUM.
- Conti A. P., Giustozzi S. Molini P., 2002, *Gli atterrati a Corridonia una storia da continuare*, Comune di Corridonia (Iniziativa a cura dell'Assessorato alla Cultura), tipografia S. Giuseppe srl, Pollenza (MC)
- Conti G., Di Chiacchio A. et all, 1998, *Terra cruda. Insediamenti in provincia di Chieti*, Cogecstre Edizioni, Penne (PE)
- Del Rosso G., 1793, *Dell'economica costruzione delle case in terra*, opuscolo deretto agl'industriosi possidenti e abitatori dell'agro toscano, edizioni J. A. Bouchard
- de Luna B. G. M. I., 1993, *Consolidation of traditional plasters: a laboratory research*, in Tierra '93, atti 7° Conferencia internacional sobre o estudo conservaço ad arquitectura de terra, ed DGEMN, Lisboa.
- Di Pasquale S., Barbi L., Briccoli Bati S., ranocchiali G., Tempesta G., 1999, *Materiali da costruzione e tecniche costruttive proprie del patrimonio storico della Toscana con particolare riguardo al mattone nei suoi diversi impieghi (mattone crudo, mattone cotto)*, in La protezione del patrimonio culturale – La questione sísmica (Atti del II Seminario Nazionale di Studio) Roma, Gangemi Editore, pp. 701-722.
- Di Sivo M., 2001, *La durata e la manutenzione degli edifici in terra*, in Costruzioni e uso della terra, Forlani M.C. (a cura di), Edizione MAGGIOLI, Repubblica di San Marino.
- Fathy H., 1973, *Architecture for the poor: an experiment in rural Egypt*. Traduzione a cura di A. Marconi Pedrazzi, 1986, *Costruire con la gente. Storia di un villaggio d'Egitto: Gournah*, Jaca Book, Milano
- Fenu L., 1999, *Sui problemi dell'estensione della normativa tecnica sugli edifici in muratura a quelli in muratura di terra cruda*, in Atti della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cagliari, vol. 42, anno XXVII, n.2.
- Forlani M. C. (a cura di), 1982, *Risorse struttura forme nell'insediamento minore*, Pescara, CLUA.

- Forlani M. C., 1982, *Territorio e costruzioni/Le abitazioni di terra*, in RST/rassegna di studi sul territorio, L'Aquila (Comunità montana Sirentina).
- Forlani M. C., 1983, *Tecnologie locali e costruzione della casa in Abruzzo*, Pescara.
- Forlani M. C., 1997, *Argomenti per una possibile reintroduzione del crudo nella produzione edilizia*, in TAC/ACTA n°8, DiTAC-Facoltà di Architettura (Pescara)-Università degli Studi "G. D'Annunzio" (CH).
- Forlani M. C., 1999, *Argomenti per una possibile reintroduzione del crudo nella produzione edilizia*, in AA.VV., *Terra cruda/Insediamenti in provincia di Chieti*, Penne (PE), Cogecstre Edizioni.
- Forlani M. C. (a cura di), 2002, *Costruzione e uso della terra*, Milano, Maggioli Editore.
- Francaviglia de Gregori E., 2003, *Adobe e pisè in terra, un confronto fra Yemen e Marocco*, *Costruire in Laterizio* n°92
- Gabriele V., Sestini V., 1998, *Materiali, tecniche costruttive tradizionali e metodi di restauro in Nepal*, (Collana: Quaderni di restauro archeologico) Alinea, Firenze.
- Galdieri E., 1976 *Curiosità di architettura minore in Iran: le torri dei piccioni*, *Bollettino del Centro Studi per la Storia dell'Architettura*, n. 24, Roma, pp. 49-53
- Galdieri E., 1976, *Idées générales sur la conservation des Monuments en Brique Crue*, ATTI della 1st Confer. on the Conservation of Mud-Brick Monuments, Yazd, Iran (ICOM-IRAN/ICOMOS, 1972) pp. 52-56
- Galdieri E., 1978, *Notes on a history of Military Architecture in Persia*, *Bulletin, Internationaler Burgen Institut*, n. 34, pp. 52-74
- Galdieri E., 1980, *Metodi avanzati nel consolidamento di alcune strutture antiche*, *Studi e Restauri di Architettura*, IsMEO, Roma, pp. 19-23
- Galdieri E., 1980, *The use of raw clay in historical buildings: economic limitation or technological choice*, *Atti del 3rd International Symposium on mud-brick preservation*, ICOM/ICOMOS, Ankara, Turchia, pp. 46-58
- Galdieri E., 1982, *Le meraviglie dell'architettura in terra cruda*, Laterza, Bari
- Galdieri E., 1986, *Arquitectura de tierra –historica y moderna- en Italia*, *Informes de la construcción*, Consejo Superior de Investigaciones Cientificas, Madrid, pp. 53-58

- Galdieri E., 1986, *Architectura de tierra en Italia*, Atti del Convegno 'Navapalos 85', Madrid, pp. 53-58
- Galdieri E., 1987, *Etat et future des batiments italiens en terre: les cas du Pièmont et de la Sardaigne*, Actes du Colloque 'Le patrimoine européen construit en terre et sa réhabilitation', ENTPE, Université de Lyon IIIe, pp. 255-269
- Galdieri E., 1987, *L'architettura militare in terra cruda*, Atti del Seminario sulla Architettura militare nei paesi extraeuropei. *Matrici e modelli*, Centro Studi per il Restauro dei Centri Storici, Firenze, pp. 55-58
- Galdieri E., 1988, *La brique crue en Italie: avons-nous une politique de conservation?*, Atti del 5th International Meeting of Experts, (Roma, 1987), ICCROM-CRATerre, pp. 51-56
- Galdieri E., 1989, *L'architettura in terra cruda: caratteristiche tecnologiche, potenzialità formali e problemi di conservazione*, in *Restauro*, Napoli, n. 94/1987, pp. 55-72
- Galdieri E., 1989, *Tecnologia y fantasia en las construcciones de tierra*, Atti del convegno 'Navapalos 86', Soria, pp. 53-59
- Galdieri E., 1990, *Arquitectura de tierra en Italia: desde las colonias griegas hasta la dominación española*, Atti della 6th International Conference on the Conservation of Earthen Architecture, 'Adobe 90', New Mexico, pp. 50-52
- Galdieri E., 1993, *L'architettura di terra nell'antichità in Italia*, in: *Architettura di Terra: Tipologia, tecnologia, progetto*, Cagliari, pp. 122-128
- Galdieri E., 1994, *Culture and Conservation*, prefazione a : Biancifiori: Works of Architectural Restoration in Oman, De Luca, Roma, pp. 14-15
- Galdieri E., 1995, *At the origin of Ceramics: earthen architecture*, Atti del Simposio internazionale 'Ceramics in Architecture' (8th CIMTEC-World Ceramic Congress), Faenza, pp. 213-218
- Galdieri E., 1996, *Da Yazd 72 al progetto GAIA: storia di una strategia di conservazione*, in *Habitat e architetture di terra*, a cura di F. Storelli, Dipart. Di Architettura e Urbanistica per l'Ingegneria, Gangemi, Roma, pp. 41-42
- Galdieri E., 1996, *Extent and characteristics of mud-brick architecture in Italy*, in collaborazione con R. Orazi, Atti del 1° congresso internazionale 'Science and technology for the safeguard of cultural heritage in the Mediterranean Basin', Cons. Naz. delle Ricerche, Catania 1995

- Galdieri E., 1996, *Costruzioni in terra in situazioni estreme*, Atti del Primo Convegno Lehmbau 96, Merano, edizione provvisoria, pp. 12-15
- Galdieri E., 1997, *Architettura di terra*, in Corrado M. (a cura di), *La casa ecologica*, De Vecchi Ed., Bologna, p.61
- Galdieri E., 1997, *Architettura di terra. Immagini italiane di una vocazione mediterranea*, in Mediterraneo, Universidad Nova de Lisboa, nn. 8/9, 1996, pp. 123-140
- Galdieri E., 1997, *Le mura di Gela*, Ambiente costruito, n. 2/97, Maggioli, pp. 40-42
- Galdieri E., 1998, *L'impiego della terra e la casa dell'uomo: tecniche, forme e funzioni nell'antichità*, in AA.VV., *Terra: incipit vita nova*, ediz. Politecnico di Torino, maggio 1998, pp.1-3
- Galdieri E., 1998, *Note sulle strutture in mattoni crudi nell'antichità*, in: Panini R. (a cura di), *Gela, il Museo Archeologico*, catalogo generale, Gela 1998, pp. 123.124
- Galdieri E., 1999, *Grandi progetti in corso d'opera*, in: Achenza M. e Sanna A. (a cura di), *Abitare la terra*, Atti del convegno, (Villamassargia e Samassi (CA) , nov. 1998) CUEC, Cagliari, pp. 41-44
- Galdieri E., 2000, *La rénovation du centre historique de Sana'a (Yemen): enjeux, risques, resultats*, in: *Trails to the East (Essays in memory of P. Cuneo)*, IEDRC, Como 2000, p. 12 pp. 202-207
- Galdieri E., 2000, *L'architettura di terra in Italia, la diffusione, le tecniche*, in: *Living Land, territori dell'abitare*, anno VI, n. 09, pp. 46-47
- Galdieri E., 2001, *Finitura e protezione di supporti murari 'deboli': la terra cruda*, *Rassegna di Architettura e Urbanistica*, Università di Roma Tor Vergata, Facoltà di Ingegneria Civile, nn. 103 -104, pp. 83-90
- Galdieri E., 2002 *Introduzione alle Meraviglie della costruzione di terra*, in: *Costruzione e uso della terra, 'Strumenti'*, Maggioli Ed., Rimini 2001, pp. 31-45
- Galdieri E., 2002, *I ricchi, i poveri e l'architettura di terra (con la mente al maestro Hassan Fathy)*, in *Living Land, territori dell'abitare*, anno VI, n. 10, pp. 52-53
- Galdieri E., 2002, *Il controllo climatico nel mondo islamico*, in: *L'architettura naturale*, V, n. 15, ANAB, EdicomEdizioni, Monfalcone, pp. 41-45
- Galdieri E., 2004, *Il restauro di strutture archeologiche in terra cruda nella pratica operativa*, in *La costruzione in terra cruda in Italia: verso*

- una normativa nazionale, Bollini G, Lion M. ed Achenza M. (a cura di), Edizione EDITORIALE ECO.
- Galizia F., 2005, *Problemi connessi alla valutazione del rischio sismico per il patrimonio architettonico e storico nei centri antichi. Il caso di Laino Castello (CS)*, tesi di dottorato
- Gasparoli P., Sabbadini S., Scudo G., 2001, *Gli intonaci in argilla*, Ambiente Costruito, 4, Maggioli Editore.
- Gatti G., Manca P., Fenu L., 1984, *Proposta di un nuovo sistema di misura delle variazioni di volume di provini sottoposti a prova triassiale*, in Atti della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cagliari, vol. 25, anno XII, n.2.
- Gomes M. I., de Brito J., 2005, “*Sismo-reforço*” de construções de terra crua, in Terra em seminario, atti IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, III Seminário Architecture de Terra em Portugal, Edizione ARGUMENTUM.
- Greco C., 2003, *Le case di terra del Fujian*, Meltemi editore, Roma
- Guillaud, Houben H, 1989, *Traité de construction en terre*, Edizione PARENTHÈSES, Marseille.
- Hall M., Djerbib Y., 2003, *Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency*, in Constructio and Building Materials, [on line] <http://elsevier.com/locate/conbuildmat>
- Hidrobo M., 2005, “*Sismo-reforço*” de construções de terra crua, in Terra em seminario, atti IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, III Seminário Architecture de Terra em Portugal, Edizione ARGUMENTUM.
- Jorge F., 2005, *Terra em seminario*, atti IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, III Seminário Architecture de Terra em Portugal, Edizione ARGUMENTUM.
- Kimbrow E. E., 1993, *Conservation principle applied to seismic retrofitting of culturally significant adobe buildings*, in Tierra '93, atti 7° Conferencia internacional sobre o estudo conservação ad arquitectura de terra, ed DGEMN, Lisboa.
- Langenbach R., 1989, *Bricks, mortar and earthquakes*, APT Bulletin [on line] <http://conservationtech.com>
- Langenbach R., 2004, *Soil dynamics and the earthquake destruction of the Arg-e-Bam*, Journal of Seismology and Earthquakes Engineering, Vol. 5, Tehran [on line] <http://conservationtech.com>

- Langenbach R., 2005, *Collapse from the inside-out*, Sismo Adobe 2005, (atti convegno) Lopes W., Ino A., Cevallos P., Pereira H., Vinuales G., Sosa M., Riòs S., Gill E., Hais A., 2003, *Las técnicas mistas de construcción con tierra*, Ed. C. Martins Neves, Brasile
- Manca P., Cadeddu G., Fenu L., 1983, *Comportamento meccanico dei terreni parzialmente saturi*, in Atti della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cagliari, vol. 22, anno XI, n.2.
- Mastrangelo Latini G., 1998, *Intorno a pença/pencire*, in Studi in memoria di Antonio Possenti, Macerata, pp.423-428.
- Mastrangelo Latini G., 1995, *Le case di terra a Colonnella* in Science and Technology for the safeguard of the Cultural heritage in the Mediterranean Basin (Atti del congresso internazionale) Catania.
- Mattone R., 1988, *Walls made of gypsum, clay and vegetal fibre masonry blocks: feasibility study* in 8th International Brick Masonry Conference (Atti del convegno) pp. 33-41.
- Mattone R., 1989, *Bearing masonry walls made of earth, sand, gypsum and vegetables fibre blocks* in Tercer Symposium CIB/RILEM Materiales y Tecnologias para la Construcción de Viviendas de Bajo Costo, (Atti del convegno) pp. 316-327.
- Mattone R., Pasero G., 1993, *La terra rinforzata con fibre vegetali: caratteristiche meccaniche, tecnologie costruttive, durabilità*, Working Paper, 63, Dip. Scienze e Tecniche per i Processi di Insediamento, Politecnico di Torino.
- Mattone R., Pasero G., 1993, *L'architecture en terre crue au Piemont: typologies et technologies dans la province d'Asti*, in Terra '93, 7° Conferencia internacional sobre o estudo e conservação da arquitectura de terra, D.G.E.M.N. (Atti della conferenza internazionale, Silves, Portogallo, ottobre 1993) Lisbona, Edizioni DGEMN, pp. 73-75.
- Mattone R., Pasero G., 1995, *Block interlocking as a means to improve the behaviour of stabilised earth masonry in seismic areas*, in International Conference on Earthquake Engineering (Atti del convegno) pp. 794-800
- Mattone R., Pasero G., Goggi F., 1995, *Stabilised soil blocks: an experience in North Est Brazil*, in atti del workshop Architettura de Terra, pp. 115-123.
- Mattone R., Pasero G., Goggi F., 1996, *Evolving technology: earth, up to date material*, in XXIVth IAHS World Housing Congress (Atti del convegno) pp. 841-847.

- Mattone R. et alii, 1996, *Un método constructivo de casas populares com tijolos prensados de terra crua estabilizados com cimento*, in 4° Congresso Brasileiro de Cimento (Atti del convegno) pp. 263-276.
- Mattone R. et alii, 1996, *Uma Experiencia de Transferencia de Tecnologia de Construção de Casas Com Tijolos Prensados de Terra Crua Em Uma Favela Paraibana*, Revista de Extensao, anno I, 2, pp. 31-46.
- Mattone R., 1997, *La produzione di blocchi in terra stabilizzata: aspetti generali del problema*, in A. Gilbert e R. Mattone (a cura di), Terra. Incipit Vita Nova – L'architettura cruda dalle origini al presente (Atti del seminario, Torino, Castello del Valentino, 16-17 aprile 1997) Torino, Politecnico, pp. 77-80.
- Mattone M., Maspero M., 1998, *La protezione degli edifici in terra: l'intonaco*, in A. Gilbert e R. Mattone (a cura di), Terra. Incipit Vita Nova – L'architettura cruda dalle origini al presente (Atti del seminario, Torino, Castello del Valentino, 16-17 aprile 1997) Torino, Politecnico.
- Mattone R., 1998, *Sperimentazione e prove di laboratorio per il controllo di qualità della muratura in terra*, in A. Sanna, M. Achenza (a cura di), Abitare la terra (Atti del convegno, Villamassargia – Samassi, 12-15 novembre 1998) Cagliari, CUEC Editrice, pp. 67-69.
- Mattone R., 2000, *Terra cruda e autocostruzione: un'esperienza nel nord-est del Brasile*, Ambiente Costruito, 1, pp. 46-52.
- Mattone R., 2001, *La terra cruda, tra tradizione e innovazione*, L'industria dei laterizi, 71, pp. 313-320.
- Mattone R., 2003, *La terra cruda tra tradizione e innovazione*, in Costruire in laterizio n° 92.
- Mattone R., 2004, *La terra cruda, materiale attuale dalle radici antiche*, in La costruzione in terra cruda in Italia: verso una normativa nazionale, Bollini G, Lion M. ed Achenza M. (a cura di), Edizione EDITORIALE ECO
- Mecca S., 2001, *Le costruzioni in terra*, in C. Monti e R. Roda (a cura di), Costruire sostenibile: il Mediterraneo, Fiere internazionali di Bologna - SAIE 2001, Firenze, Alinea, pp. 286-291.
- Mendonça de Oliveira M., 2005, *O solo-cal: uma visão histórica e documental*, in Terra em seminario, atti IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, III Seminário Architecture de Terra em Portugal, Edizione ARGUMENTUM.

- Minke G., 2001, *Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra*.
- Minke G., 2003, *Colline artificiali di argilla*, *Costruire in Laterizio* n°92
- Moor G, Heathcote K., 2002, *Earth Building in Australia—Durability Research*, [on line] <http://dab.uts.edu.au/ebi/popus/articleswindow.php>
- Moraru D. S. et all, 1993, *La Consolidation des Constructions historiques et on archeologiques en terre (Argile) par injection electrocinétique avec une solution de chaux-betonite-uree*, in *Tierra '93*, atti 7° Conferencia internacional sobre o estudo conservação ad arquitectura de terra, ed DGEMN, Lisboa.
- Munafò P., Antonucci R., D'Orazio M., 1994, *Gli «atterrati» di Corridonia. La tradizione costruttiva delle case in terra nelle Marche*, in *La ricerca nel recupero edilizio (Atti del convegno) Ancona*, pp. 15-26.
- Munafò P., D'Orazio M., 1997, *Hygrothermic behaviour of earth-brick's masonries*, in *ICIBEST '97 (Atti del convegno) Bath (UK)*, Vol.I, pp. 63-76.
- Munafò P., 1998, *La terra cruda tra tradizione e innovazione* in A. Gilbert e R. Mattone (a cura di), *Terra. Incipit Vita Nova – L'architettura cruda dalle origini al presente (Atti del seminario, Torino, Castello del Valentino, 16-17 aprile 1997)* Torino, Politecnico, pp. 69-76.
- Munafò P., D'orazio M., 1999, *Edifici in terra*, *Modulo*, 247 gennaio 1999, pp. 1116-1119.
- Narici B., 1999, *Recuperare la terra*, *Ambiente Costruito*, 6, Maggioli Editore.
- Narici B., Scudo G., Talamo C., 2001, *Costruire con la terra*, Napoli, Gruppo editoriale Esselibri-Simone.
- Neuman J. V., 2005, *Intervencion sismoresistente de estructuras históricas de adobe. Getty Seismic Adobe Project*, , in *Terra em seminario, atti IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, III Seminário Architecture de Terra em Portugal*, Edizione ARGUMENTUM.
- Oliver A., 2000, *Fort Selden. Adobe Test Wall Project. Phase I final report*, Getty Conservation Institute, L.A.
- Palombarini A., 1982, *Case di terra nel Maceratese*, *Proposte e ricerche*, 7, pp. 69-76.

- Palombarini A., 1985, *Case di terra*, in S. Anselmi (a cura di), *Inse-
diamenti rurali, case coloniche, economia del potere nella storia
dell'agricoltura marchigiana*, Cassa di Risparmio di Jesi, pp.186-193.
- Palombarini A., 1987, *Le case di terra*, in S. Anselmi e G. Volpe (a cu-
ra di), *Marche (Collana: L'architettura popolare in Italia diretta da E.
Guidoni)*, Roma-Bari, Laterza, pp.171-182.
- Pasqualini D., 2003, *La valutazione della resistenza sismica degli edifi-
ci in terra*, in *La costruzione in terra cruda in Italia: verso una normati-
va nazionale*, Bollini G. e Lion M. (a cura di), Edizione EDITORIALE
ECO.
- Quiun D., San Bartolomè A., Zegarra L., Giesecke A., 2005, *Adobe
reforzado con mallas de alambre: ensayos de simulación sismica y
aplicación a construcciones reales*, in atti Sismoadobe 2005.
- Ranocchiali G., Rovero L., 1994, *Influence of inserting fired bricks on
mechanical characteristics of adobe walls*, International Symposium on
Ceramics in Architecture, World Ceramics Congress, 8th CIMTEC,
Florence.
- Rocha M., 2005, *Consolidação das muralhas de taipa no castelo de
Reina*, in *Terra em seminario, atti IV Seminário Ibero-Americano de
Construção com Terra, III Seminário Architecture de Terra em Portu-
gal*, Edizione ARGUMENTUM.
- Sabbadini S., 1997, *Costruzioni in terra cruda in Italia*, *Ambiente Co-
struito*, 2, Maggioli Editore, pp. 56-59.
- Sabbadini S., 2000, *Architettura, arte e terra cruda*, in A. Demittenaere
e C. Morosin (a cura di), *Opera Bosco, museo di arte nella natura*, Cal-
cata (VT), ed. Opera Bosco, stampa Telligraf srl- Civitacastellana (VT).
- Sanna A., 1992, *Caratteri tipologici e costruttivi dell'architettura tra-
dizionale della Sardegna. Materiali per un Manuale del Recupero*, Ca-
gliari, CUEC Editrice.
- Sanna A., 1993, *A rehabilitation project for an earthen historic centre*,
in *Terra '93, 7° Conferencia internacional sobre o estudo e conservação
da arquitectura de terra, D.G.E.M.N. (Atti della conferenza internazio-
nale, Silves, Portogallo, ottobre 1993)* Lisboa, Edizioni DGEMN, pp.
341-347.
- Sanna A., 1993, *Caratteri tipologici e costruttivi: Regola, norma, recu-
pero delle architetture in terra cruda*, in A. SANNA (a cura di), *Archi-
tecture in terra. Tipologia, Tecnologia, Progetto (Atti del seminario,*

- Quartu Sant'Elena, 26 giugno 1990) Cagliari, CUEC Editrice, pp.13-30.
- Sanna A., 1997, *Materiali per una «guida al recupero» delle architetture in terra cruda in Sardegna*, in G. Scudo e S. Sabbadini (a cura di), *Le regioni dell'architettura in terra*, Rimini, Maggioli Editore, pp.63-78.1
- Sanna A., Achenza M. (a cura di), 1999, *Abitare la terra* (Atti del convegno, Villamassargia –Samassi, 12-15 novembre 1998) Cagliari, CUEC Editrice.
- Scudo G., Morfini L., 1988, *Materiali clima costruzioni*, Milano, CLUP.
- Scudo G., Bonati N. (a cura di), 1994, *Architettura in Terra: memoria e innovazione*, Milano, CLUP.
- Scudo G., Sabbadini S. (a cura di), 1997, *Le regioni dell'architettura in terra in Italia*, Rimini, Maggioli.
- Scudo G., Narici B., 1999, *L'architettura in terra tra recupero e innovazione*, Ambiente Costruito, 6, Maggioli Editore.
- Scudo G., Narici B., Talamo B., 2004, *Costruire con la terra*, Edizione Sistemi Editoriali Se.
- Sestini V., Somigli E. (a cura di), 1999, *Bagmati river park 2000*, Preliminary Study, Firenze Edizioni Polistampa.
- Sestini V., 1998, *La terra cruda, Tradizioni e tecnologie nel patrimonio architettonico himalayano*, Costruire in Laterizio, 64, luglio-agosto, Faenza, Faenza Editrice.
- Sestini V., Somigli E., 1999, *Bagmati River Park: An indicative plan for a sustainable development*, in *Culture in sustainable development: an Italian Strategy*, a cura del Ministero degli Affari Esteri, Roma, Christengraf.
- Sicignano E., 1999, *Fabrizio Càrola. Tra tradizione ed innovazione*, Costruire in Laterizio n°74
- Sorelli F. (a cura di), 1996, *Habitat e architetture di terra. Le potenzialità delle tradizioni costruttive*, Gangemi editore, Roma
- Sosa M.E., Ferreyra I.C., 2005, *Degradación de las superficies de muros de adobes por acción de fenómenos climáticos*, in *Terra em seminário, atti IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, III Seminário Architecture de Terra em Portugal*, p. 281, Edizione ARGUMENTUM.

- Storage S., 2004, *Identificazione delle carenze costruttive e strategie di corretta realizzazione di edifici in terra cruda nelle zone sismiche*, in *La costruzione in terra cruda in Italia: verso una normativa nazionale*, Bollini G, Lion M. ed Achenza M. (a cura di), Edizione EDITORIALE ECO
- Storelli F., 1996, *I valori della tecnica: le ragioni di un convegno*, in F. Storelli (a cura di), *Habitat e architetture di terra, le potenzialità delle tradizioni costruttive* (Atti del convegno internazionale - seminario di studi, Roma, 2-3 dicembre 1994) Roma, Gangemi Editore, pp.11-17.
- Teutonico J. M., 2004, *L'istituto Getty di Conservazione e la conservazione dell'architettura di terra*, in *La costruzione in terra cruda in Italia: verso una normativa nazionale*, Bollini G, Lion M. ed Achenza M. (a cura di), Edizione EDITORIALE ECO
- Tolles E. L., Kimbro E. E., Webster F. A., Ginell W. S., 2000, *Seismic Stabilization of Historic Adobe Structures*, [on line]: <http://getty.org>
- Tolles E. L., 1993, *Sismic retrofitting of Historic adobes*, in *Tierra '93*, atti 7° Conferencia internacional sobre o estudo conservação ad arquitectura de terra, ed DGEMN, Lisboa.
- Vargas J., Blondet M., Bariola J., Mehta P. K., 1984, *Seismic strength of adobe masonry*
- Vargas J., Blondet M., Ginocchio F., Villa García G., 2005, *35 años de investigaciones en sismo Adobe: La tierra armada*, in *SismoAdobe 2005*, ATTI CONVEGNO
- Vargas Neuman J., 1993, *Earthquake resistant rammed-earth (tapial) buildings*, in *Tierra '93*, atti 7° Conferencia internacional sobre o estudo conservação ad arquitectura de terra, ed DGEMN, Lisboa.
- Varum H., Martins T., Velosa A., 2005, *Caracterização do adobe em construções existentes na região de aveiro*, in *Terra em seminario*, atti IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, III Seminário Architecture de Terra em Portugal, p. 233, Edizione ARGUMENTUM
- Velasquez I. C., Nuñez de Hércules D., 2005, *La Construcción con Adobe en el Salvador lecciones aprendidas a raíz de los sismos del 2001*, in *Terra em seminario*, atti IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, III Seminário Architecture de Terra em Portugal, p. 233, Edizione ARGUMENTUM
- Vencatarama Reddy B. V., Lokras S. S., 1998, *Steam-cured stabilised soil blocks for masonry construction*, in *Energy and buildings* n° 29

Vinuales G., 1994, *Arquitectura de tierra en Iberoamerica*, Ed. A. Calla, Bolivia
Wiese, R., 2005, *Sismoadobe 2005*, atti seminario internacional, 16-19 Maggio, 2005, Lima ,Perù

APPENDICE 1

Beni monumentali in terra cruda inclusi nella lista del patrimonio mondiale dell'umanità

ALGERIA:

M'Zab Valley (some parts) e Casbah of Algiers (some parts)

AZERBAIJAN:

Walled city of Baku (the walls and majority of people's houses)

BENIN:

Royal Palaces of Abomey

BOLIVIA:

City of Potosi (mainly housing) e Historic City of Sucre

BRASIL:

Historic Town of Ouro Preto, Historic Centre of the Town of Olinda (mainly housing), Historic Centre of Salvador de Bahia, Sanctuary of Bom Jesus de Congonhas, Historic Centre of São Luis, Historic Centre of the Town of Diamantina, Historic Centre of the Town of Goiás

CHINA:

Mausoleum of the First Qin Emperor (separation walls), The Great Wall (numerous portions), Mogao caves, Historic Ensemble of the Potala Palace, Lhasa (partially in rammed earth)

COSTA RICA:

Area de Conservación Guanacastle

CUBA:
Old Havana and its Fortifications (Housing and monuments) e



Trinidad and Valley of los Ingenios



EQUADOR:
City of Quito



Historic Centre of Santa Ana de los Rios de Cuenca (mainly housing)



EL SALVADOR

Joya de Ceren Archaeological Site



FRANCE

Canal du Midi

Historic City of Lyon (houses in Rammed Earth in Croix-Rousse)



Provins, Town of Medieval Fairs (historic town in colombages)



GHANA
Asante Traditional Buildings

GUATEMALA

Antigua Guatemala (people's housing)



IRAN

Choga Zambil



JAPAN

Historic Monuments of Ancient Kyoto: (The exterior walls of the Imperial City) (The garden of Kinkaku-ji Temple (Golden Temple))



Buddhist monuments in the Horyu-ji Area



Himeji-jo



Historic Villages of Shirakawa-go and Gokayama



Itsukushima Shinto Shrine

Historic Monuments of Ancient Nara (people's housing)



Shrines a Temples of Nikko

LYBYAN ARAB JAMAHIRIYA

Old Town of Ghadames



MADACASCAR

The Royal Hill of Ambohimanga

MALI

Old Town of Djenné



Timbuktu (Mosques and housing)



Cliff of Bandiagara (Dogos)



MAURITANIA

Ancient Ksour of Oudane, Chinguetti, Tichitt and Oualata (stone and earth)



MEXICO

Centro histórico de Oaxaca y zona arqueológica de Monte Albán



Ciudad prehispánica de Teotihuacan



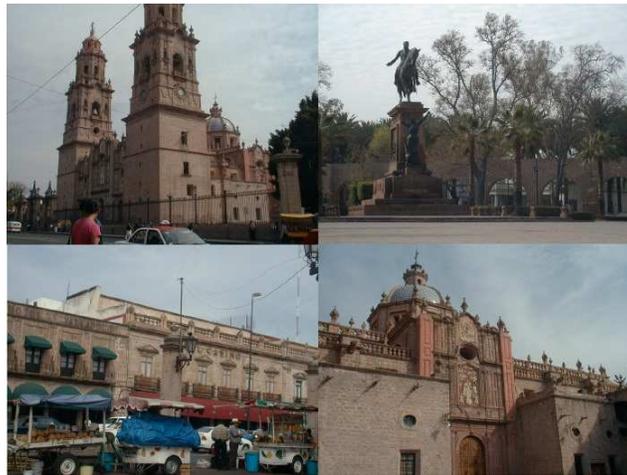
Centro histórico de México y Xochimilco
Centro histórico de Puebla



Centro histórico de Guanajuato y sus minas adyacentes



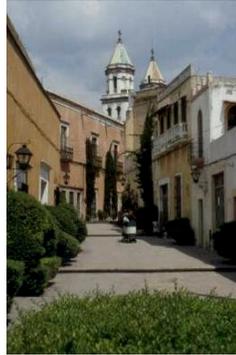
Centro histórico de Morelia



Centro histórico de Zacatecas



Zona de monumentos históricos de Querétaro



Zona arqueológica de Paquimé, Casas Grandes



Zona de monumentos históricos de Tlacotalpán



Zona de monumentos arqueológicos de Xochicalco



MAROCCO
Medina of Fez



Medina of Marrakesh



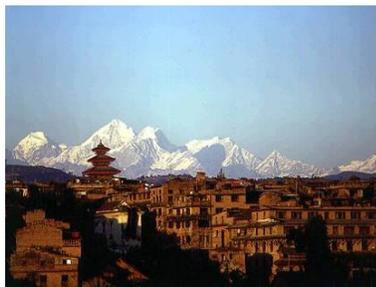
Ksar of Ait Ben Haddou



Historic City of Meknes



Archeological site of Volubilis



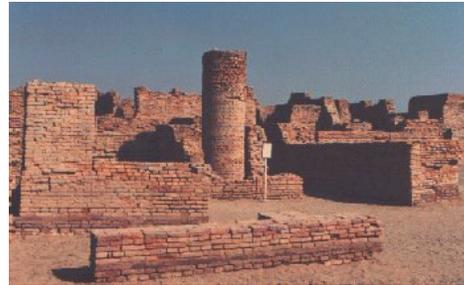
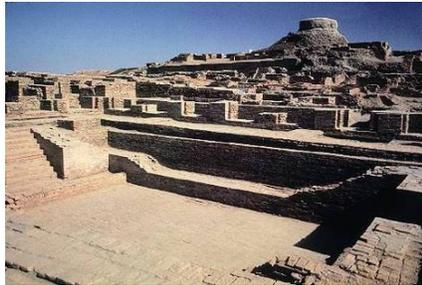
NEPAL
Kathmandu Valley



OMAN
Bahia Fort



PAKISTAN
Archeological Ruins of Moenjodaro



PERÙ
City of Cuzco



Chan Chan Archeological Zone



Historic Centre of Lima



Lines and Geoglyphs of Nasca and pampas de Jumana

PORTUGAL

Central Zone of the Town of Angra do Heroismo un the Azores



Historic Centre of Evora



Historic Centre of Oporto
Historic Centre of Guimarães

REPUBLIC OF KOREA
Changdeokgung Palace Complex

SPAIN
Historic Centre of Cordoba
Alhambra, Generalife and Albayzin, Granada
Parque Güell, Palacio Güell and Casa Mila in Barcelona
Mudejar Architecture of Argon
Reales Alcázares of Seville

SYRIAN ARAB REPUBLIC
Ancient City of Damascus (people's housing)
Ancient City of Aleppo (people's housing)

TUNISIA
City of Charthage (people's housing of the 2nd Century B.C. on the Hill of Byrsa)
Medina of Tunis (people's housing)
Runic Town of Kerkouane (people's housing of the punic period)

Medina of Sousse (people's housing)

TURKMENISTAN

State historical and Cultural Park of "Ancient Merv"

UGANDA

Tombs of Buganda Kings at Kasubi (walls)

UNITED KINGDOM

Hadrian's Wall (portions)

UNITED STATES OF AMERICA

Mesa Verde ("Jacal Houses")

Cahokia Mounds state Historic Site

Chaco Culture National Historical Park (Kivas and people's houses)

Pueblo of Taos

URUGUAY

Historic Quarter of the City of Colonia de Sacramento (people's houses)

UZBEKISTAN

Itchan Kala

Historic Centre of Bukhara

Historic Centre of Shakhrisyabz (people's houses)

VENEZUELA

Coro and its Port

YEMEN

Old walled City of Shibam



Old City of Sana'a



Historic Town of Zabid

APPENDICE 2

Schede Tecniche

Adobe		CARATTERISTICHE TECNICHE	
DOVE?	IN ITALIA	MESSA IN OPERA	PESO SPECIFICO
Egitto, Mali, Perù, e per quello di produzione industriale Nuovo Messico, California, Australia	Sud della Sardegna (ladini), Calabria, Basilicata, Pianura Padana, Piemonte, Abruzzo, Marche, Toscana.	La terra, setacciata al fine di eliminare eventuali sassi o ghiaia, viene mescolata con acqua fino a raggiungere una consistenza plastica quasi molle. L'impasto si può eseguire, calpestandolo su di un'area ristretta, meccanicamente con piccole betoniere o utilizzando un trattore su vaste aree. Si bagnano le forme, si cospargono di sabbia (al fine di facilitare la fuoriuscita del mattone) e si posizionano nel luogo dell'essiccamento. A questo punto si versa l'impasto nelle forme, distribuendolo uniformemente e compiendolo leggermente gli angoli. Con un'ascella si elimina l'impasto in eccesso e si solleva con una leggera vibrazione la forma per riattivare il mattone si lascia essiccare per circa una settimana, rigirandolo per favorire l'essiccamento di tutte le facce. Concluso l'essiccamento e prodotto un numero sufficiente di mattoni, si può procedere alla posa in opera utilizzando una malta a base di terra, evitando il calcestrutto.	1400-1600 kg/mc per quello tradizionale, mentre la produzione industriale produce blocchi da 1500, 1800 e 1900 kg/mc
			RESISTENZA A COMPRESSIONE 4,25-2,25 MN/mq 20 bar
			CALORE SPECIFICO
			15 - 18% argilla, 10 - 28% limo, 55 - 75% sabbia, 15 - 30% acqua In alcune aree si aggiunge la paglia al fine di migliorare la resistenza a trazione e ridurre il ritiro (3 - 6% in peso di paglia)
			COMPOSIZIONE
			RITIRO 0,1 - 0,4%
			ACCUMULO DI CALORE
		PERIODO	
		È importante produrre i mattoni prima delle gelate invernali, mentre il muro può essere eseguito in qualunque periodo	
CONCLUSIONI	E' adatta alla costruzione di pareti interne ed esterne e garantisce un ottimo microclima interno. Nei paesi freddi, per la realizzazione di pareti esterne, è opportuno affiancarci pareti in materiali più leggeri al fine di migliorare l'isolamento termico.		

Pisè e Stampflehm

Pisè e Stampflehm	
<p>DOVE?</p> <p>"Si tratta di una tecnica sviluppata in Medio Oriente e diffusasi dal Magreb in Spagna e da qui in Europa, anche grazie ai trattati scientifici pubblicati da Francois Comtreaux alla fine del Settecento e poi tradotti in varie lingue, portando la diffusione di questa tecnica e dei suoi sostenitori in Svizzera, Germania, e anche in Italia, dove Giuseppe Del Rosso pubblica il fascicolo "Dell'economica costruzione delle case in terra"</p>	<p>IN ITALIA</p> <p>Piemonte: tra i fiumi Scrivia e Bor-mida. Nelle città di Alessandria, Tortona e Novi Ligure</p>
<p>MESSA IN OPERA</p> <p>La terra scavata in situ, opportunamente miscelata con acqua ed eventuali inerti, è versata all'interno di casseri di diversa forma e compattata. Si versano circa 20 cm di terra per volta che poi viene compattata con una conseguente perdita di volume di 1/3. Una volta completato il cassero si passa al livello successivo smontando e rimontando i casseri accento o al di sopra del muro costruito. I muri devono essere spessi almeno 20 cm. Si possono aprire tutti i tipi di aperture lasciando all'interno dei casseri delle guide o delle casseforme rimovibili o a perdere come ad esempio gli infissi. E' importante posizionare delle travi al di sopra delle aperture, travi che devono sporgere nella muratura per almeno 1/20 dell'apertura in modo da ripartire i carichi, oppure si realizzano degli archi.</p>	<p>TECNICA COSTRUTTIVA</p>
<p>CONCLUSIONI</p>	<p>E' adatta alla costruzione di pareti interne ed esterne e garantisce un ottimo microclima interno. Nei paesi freddi, per la realizzazione di pareti esterne è opportuno affiancarci pareti in materiali più leggeri al fine di migliorare l'isolamento termico.</p>
<p>PERIODO</p>	<p>Periodo</p>
<p>RESISTENZA A COMPRESSIONE</p>	<p>1,8kN/mq</p>
<p>PESO SPECIFICO</p>	<p>1800-2100 kg/mc</p>
<p>CALORE SPECIFICO</p>	<p>ca.1,0kg/kgK</p>
<p>COMPOSIZIONE</p>	<p>Terra magra e sabbiosa, con ghiaia o piccoli sassi che costituiscono lo scheletro rigido delle murature. 10% argilla, 30-50% limo e 40-60% sabbia, acqua per 14-18%</p>
<p>RITIRO</p>	<p>minimo (avendo compattato la terra umida). Si considera un valore attorno allo 0,2-0,4%</p>
<p>ACCUMULO DI CALORE</p>	<p>ca. 1800/2100 kJ/mcK</p>

Bauge-Cob-Massone	
DOVE? Yemen, Devon inglese, Germania (Lipsia, Weimar), Normandia, Bretagna francese.	IN ITALIA Abruzzo
TECNICA COSTRUTTIVA	MESSA IN OPERA Si scioglie la terra mescolandola con acqua e formare un impasto plastico dopo di che si estrae una quantità di terra e la si impasta con la paglia. L'impasto si fa riposare per qualche ora e poi si gettano diverse parti una accanto e sopra l'altra fino a raggiungere lo spessore desiderato e l'altezza di circa 60 cm. L'impasto viene compatato camminando; sopra. E' necessario inizialmente garantire la verticalità della parete e contrastare la tendenza allo spaccamento dei lati colpendo le pareti sui lati durante la realizzazione. Se ci sono sporgenze si eliminano e, atteso l'essiccamento del corso, si procede alla posa dello strato successivo avendo cura di continuare per strati a 45°. Durante l'essiccamento si verificano ritiri, compensati alla quantità di paglia contenuta e alla qualità dell'argilla. Questi ritiri comportano un assetamento generale del corso, motivo per cui e necessario attendere l'essiccamento del corso prima di procedere al getto di quello successivo. Il tempo di messa in opera si aggira intorno alle 6h al metro quadro per la produzione e la messa in opera dell'impasto su di uno spessore di circa 50cm.
CONCLUSIONI	PERIODO (da Aprile ai primi di Settembre, e importante che il muro sia secco prima delle gelate invernali)
CARATTERISTICHE TECNICHE	PESO SPECIFICO 900-1600 kg/mc
RESISTENZA A COMPRESSIONE	RESISTENZA A COMPRESSIONE ca. 15 bar (1/20 del cemento classico)
CALORE SPECIFICO	CALORE SPECIFICO 1 kg/kgK
COMPOSIZIONE	COMPOSIZIONE Terre grasse, spesso classificate come limose-argillose: percentuale di argilla compresa tra il 10 e il 20%, 45-65% limo, 20-40% sabbia. La quantità di acqua è compresa tra il 15 e il 35% e la paglia, di qualsiasi tipo, in proporzione dell'1-3% rispetto alla terra.
RITIRO	RITIRO
MODULO DI YUNG	MODULO DI YUNG ca. 2000-3000 bar
ACCUMULO DI CALORE	ACCUMULO DI CALORE
CONCLUSIONI E' adatto alla realizzazione di pareti portanti interne ed esterne. Per la capacità di accumulo termico e di regolazione dell'umidità dell'impasto è adatto ai climi caldi o alla realizzazione di pareti di accumulo dietro a serre.	

Torchis (Strohlem, wattle and daub)

DOVE?	IN ITALIA	MESSA IN OPERA	CARATTERISTICHE TECNICHE
<p>Africa del Nord-Ovest, del Sud e del Sud-Est, Indonesia, Cina e Giappone, area mitile europea ed Est Europa, Nord America e sulla costa Est, America Latina</p>		<p>Si preparano a parte la terra, miscelata con acqua e se necessario con sabbia fino ad ottenere un impasto plastico ed omogeneo, e la paglia, lasciata a bagno per qualche ora e, una volta estratta, lasciata colare per eliminare l'acqua in eccesso. Si mescolano i due componenti calpestandoli fino a che la paglia sia completamente immersa dopo di che si estrae l'impasto e lo si lascia asciugare per un tempo variabile tra 6 ore e due settimane a seconda del clima.</p>	<p>PESO SPECIFICO 900-1600 kg/mc</p> <p>RESISTENZA A COMPRESIONE ca. 1,5 bar</p> <p>CALORE SPECIFICO ca. 1,0 kg/kgK</p> <p>MODULO DI YOUNG ca. 2000-3000 bar</p>
	<p>TECNICA COSTRUTTIVA</p>		<p>COMPOSIZIONE 10-20% argilla, 45-65% limo, 20-40% sabbia, (terre grasse classificate come limoso-argillose), 15-35% acqua, 1-5% paglia.</p>
			<p>RITIRO può essere consistente ma facilmente aggristati riempendo gli spazi vuoti con altro torchis ed essiccamento avvenuto o durante</p>
			<p>ACCUMULO DI CALORE</p>
<p>CONCLUSIONI</p>	<p>E' adatto alla realizzazione di pareti interne ed esterne di tamponamento e di particolari decorativi vista la sua elevata plasticità</p>		

APPENDICE 3

Prove tecniche di cantiere

Le costruzioni in terra cruda necessitano di un suolo con alta componente argillosa, quindi, quando ci si accinge alla costruzione, il primo passo è quello di verificare la qualità del terreno disponibile in loco. Le prove per verificare la quantità di argilla presente nel terreno sono molteplici, da quelle di laboratorio, che necessitano di strumentazioni sofisticate, a quelle eseguibili con strumenti rudimentali anche in cantiere. Queste ultime sicuramente non possono darci una valutazione quantitativa delle componenti del materiale, ma ci forniscono gli strumenti necessari a valutare la qualità della terra, possono darci informazioni sulla componente argillosa, sulla coesione della terra, sulla resistenza del materiale e sul ritiro dopo l'impasto. A tal scopo le prove da eseguirsi sono:

1. Prova di sedimentazione: la terra, estratta in loco e lasciata essiccare per almeno una settimana, in modo da farle perdere l'umidità naturale, è versata in un contenitore dal fondo piatto e possibilmente graduato, della capacità di un litro. Il contenitore si riempie per un terzo di terra e per la restante parte di acqua. Il composto va prima mescolato con una barra di ferro o una stacca di legno e poi agitato. L'argilla presente nella terra assorbirà acqua, il che comporterà una diminuzione del suo livello nel contenitore: l'acqua va rabboccata fino all'orlo. I contenitori, così preparati si lasciano "sedimentare" per almeno due giorni, e poi si valuta la percentuale di argilla rispetto agli altri componenti presenti nel terreno. In seguito a prove eseguite sul terreno locale, in zone in cui sono presenti le "pinciaie" si è potuta constatare un'alta presenza di argilla con una conseguente diminuzione della percentuale di inerti (sabbia). Dall'analisi visiva della acqua che si sedimenta nella parte superiore del contenitore, si può dedurre che l'argilla presente in questo tipo di terra è abbastanza grassa (purezza della sedimentazione).
2. Prove all'olfatto ed al morso: servono a valutare la qualità dell'argilla l'assenza di sostanze organiche nel terreno. A tale scopo si prepara l'impasto di terra ed acqua facendo attenzione

ad eliminare e rompere tutte le parti grosse di argilla, fino ad ottenere un composto plastico (il composto si utilizzerà per tutte le prove descritte di seguito). Se il composto odora di muffa allora il terreno contiene sostanze organiche e non è adatto all'utilizzo nella costruzione perché genererebbe muffe nelle strutture. La prova al morso invece consiste nel masticare una piccola parte di impasto e nel verificarne la consistenza: se si ha una sensazione come di sapone allora il terreno è argilloso, se si sentono granelli sotto i denti siamo in presenza di un terreno sabbioso.

3. Prova del lavaggio delle mani: ancora utile ad una prima valutazione della qualità del terreno è questa prova. Una volta terminato l'impasto si lavano le mani sotto un getto d'acqua non troppo forte: a seconda della facilità o meno di eliminare la terra e della sensazione tattile che si ha è possibile valutare se c'è o meno argilla nel terreno. Un composto che si toglie difficilmente e che da una sensazione come di sapone è ottenuto utilizzando un terreno prevalentemente argilloso.

Una volta effettuate le prove fin qui descritte è possibile passare alla valutazione delle caratteristiche fisico-meccaniche della terra.

- Prove di coesività: esistono due tipi di prova, uno da effettuarsi con una sfera di terra ed un altro con un campione cilindrico:
 - L'impasto è modellato a mano a formare dei salsicciotti di circa 20 cm e di diametro costante. Una volta formato il salsicciotto si solleva lentamente fino a che non si spezza. Se si rompe a meno di 5 cm dal punto di presa significa che non c'è sufficiente coesione, se invece si spezza oltre i 15 cm allora la quantità di argilla contenuta nel terreno è eccessiva e per essere utilizzato è necessario aggiungervi della sabbia.
 - L'impasto è modellato a mano a formare una sfera del diametro di circa 5 cm. Con un coltello si taglia in due la palla e si esamina la lucentezza delle facce tagliate: all'aumento della lucentezza aumenta la percentuale di argilla. La verifica della coesività è fatta verificando la

resistenza al taglio della sfera. Prima del taglio è ancora possibile testare la coesione infilando la punta di un coltello all'interno della sfera e valutando la resistenza offerta dal materiale alla penetrazione, più resiste più la coesione è alta. Inoltre una volta estratta la lama, osservando la quantità di materiale che rimane sul coltello si può stabilire se il terreno è più o meno argilloso.

- Prova di ritiro: una caratteristica molto importante da valutare è il ritiro, fattore che sarà fondamentale nella scelta della tecnica costruttiva da utilizzarsi. Si predispongono delle forme in legno opportunamente inumidite. Al loro interno si versa l'impasto facendo attenzione a farlo aderire bene agli angoli; dopodiché si mette ad essiccare all'ombra e all'asciutto. Dopo due o tre giorni si va a verificare la percentuale di ritiro ed il livello di fessurazione.

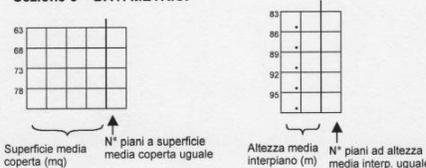
Il terreno presente nell'area di diffusione del massone è un suolo ad alta componente argillosa e ciò rende chiaro il perché dell'utilizzo di questa tecnica costruttiva: per realizzare dei mattoni di terra cruda è necessario un terreno meno argilloso perché la grossa quantità di argilla comporta anche una maggiore ritenzione di acqua con un conseguente aumento del fenomeno del ritiro che, sui mattoni essiccati, genera oltre alla riduzione delle dimensioni, anche fessure ed in alcuni casi polverizzazione del materiale.

Con il massone questo problema è superato: l'aggiunta di lunghi filamenti di paglia tubolare migliora le prestazioni del composto e regola il ritiro, inoltre il posizionamento a umido del materiale per filari successivi e la compressione di messa in opera permettono da un lato l'assestamento del materiale e dall'altro il rilascio dei liquidi in eccesso.

APPENDICE 4

Schede di 1° e 2° livello del GNDT

GRUPPO NAZIONALE PER LA DIFESA DAI TERREMOTI (G.N.D.T.) – C.N.R.
Scheda di 1° livello per il rilevamento dell'esposizione e della vulnerabilità degli edifici

Sezione 1 – DATI RELATIVI ALLA SCHEDA Codice ISTAT Provincia ¹ _____ Codice ISTAT Comune ³ _____ Comune _____		Scheda n° ⁶ _____ Data ¹¹ _____ Squadra ¹⁷ _____ Prescheda _____																																																																																							
Sezione 2 – LOCALIZZAZIONE EDIFICIO Codice ISTAT sezione Censuaria ¹⁹ _____ RIFERIMENTO CATASTALE Foglio ²² _____ Mappale ²⁵ _____ Particella ²⁸ _____ CARTOGRAFIA DI RILEVAZIONE Foglio ³² _____ Aggregato strutturale ³⁴ _____ Edificio ³⁸ _____ URBANISTICA Zona di piano ⁴⁰ _____ Piano attuativo ⁴¹ _____ Vincoli ⁴² _____		Aggregato strutturale _____ Edificio _____ 0 via, viale 1 corso 2 vicolo 3 piazza, largo ⁴³ _____ 4 località Nome ⁴⁴ _____ N° civico ⁵⁶ _____ N° accessi ⁶⁰ _____ N° fronti a comune ⁶² _____																																																																																							
Sezione 3 – DATI METRICI 		Altezza massima fuori terra valutata alla gronda (m) ⁹⁸ _____ Altezza minima fuori terra valutata alla gronda (m) ¹⁰¹ _____ Larghezza stradale fronte principale (m) ¹⁰⁴ _____																																																																																							
Sezione 4 – USO Totale unità d'uso ¹⁰⁶ _____ Stato dell'edificio ¹⁰⁸ _____ F finito N non finito C in costruzione Totale unità d'uso ¹⁰⁹ _____ 1 totalmente utilizzato 2 parzialmente utilizzato 3 non utilizzato 4 abbandonato		Proprietà ¹¹⁰ _____ Conduzione prevalente ¹¹¹ _____ 1 diretta 2 in locazione																																																																																							
1 si ¹¹² _____ 2 no _____ Abitazioni occupate ¹¹³ _____ N° _____ Sup. % _____		Abitazioni libere ¹¹⁶ _____ N° _____ Sup. % _____																																																																																							
Abitazioni occup. salt. ¹¹⁹ _____ N° _____ Sup. % _____		Att. produttive ¹²² _____ 1 si _____ 2 no _____ Servizi pubblici ¹²³ _____ 1 si _____ 2 no _____ Denomin. edificio ¹²⁴ _____																																																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Unità d'uso</th> <th colspan="4">Intensità d'uso</th> <th rowspan="2">Bacino Di utenza</th> </tr> <tr> <th>N°</th> <th>Codice</th> <th>Tipo</th> <th>Sup. %</th> <th colspan="2">Periodo di utilizzazione</th> <th colspan="2">Utilizzazione Potenziale</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th>Mesi</th> <th>giorni</th> <th>media</th> <th>max</th> <th>h/gg</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>138</td> <td>140</td> <td>143</td> <td>144</td> <td>145</td> <td></td> <td>150</td> <td></td> <td>157</td> <td>159</td> </tr> <tr> <td>160</td> <td>162</td> <td>165</td> <td>166</td> <td>167</td> <td></td> <td>172</td> <td></td> <td>179</td> <td>181</td> </tr> <tr> <td>182</td> <td>184</td> <td>187</td> <td>188</td> <td>189</td> <td></td> <td>194</td> <td></td> <td>201</td> <td>203</td> </tr> <tr> <td>204</td> <td>206</td> <td>209</td> <td>210</td> <td>211</td> <td></td> <td>216</td> <td></td> <td>223</td> <td>225</td> </tr> <tr> <td>226</td> <td>228</td> <td>231</td> <td>232</td> <td>233</td> <td></td> <td>238</td> <td></td> <td>245</td> <td>247</td> </tr> <tr> <td>248</td> <td>250</td> <td>253</td> <td>254</td> <td>255</td> <td></td> <td>260</td> <td></td> <td>267</td> <td>269</td> </tr> </tbody> </table>				Unità d'uso				Intensità d'uso				Bacino Di utenza	N°	Codice	Tipo	Sup. %	Periodo di utilizzazione		Utilizzazione Potenziale						Mesi	giorni	media	max	h/gg	138	140	143	144	145		150		157	159	160	162	165	166	167		172		179	181	182	184	187	188	189		194		201	203	204	206	209	210	211		216		223	225	226	228	231	232	233		238		245	247	248	250	253	254	255		260		267	269
Unità d'uso				Intensità d'uso				Bacino Di utenza																																																																																	
N°	Codice	Tipo	Sup. %	Periodo di utilizzazione		Utilizzazione Potenziale																																																																																			
				Mesi	giorni	media	max	h/gg																																																																																	
138	140	143	144	145		150		157	159																																																																																
160	162	165	166	167		172		179	181																																																																																
182	184	187	188	189		194		201	203																																																																																
204	206	209	210	211		216		223	225																																																																																
226	228	231	232	233		238		245	247																																																																																
248	250	253	254	255		260		267	269																																																																																

G.N.D.T. – SCHEDE DI VULNERABILITÀ DI 2° LIVELLO (MURATURA)



Codice STAT Provincia		Codice STAT Comune		Scheda N°				
PARAMETRI	Class.	Qual.	ELEMENTI DI VALUTAZIONE					
1 TIPO ED ORGANIZZAZIONE DEL SISTEMA RESISTENTE (S.R.)	11	22	Nome nuove costruzioni (Clas. A)	1				
			Nome riparazioni (Clas. A)	2				
			Cordoli e catene tutti i livelli (Clas. B)	3				
			Buoni ancoraggi fra muri (Clas. C)	4				
			Senza cordoli catini ancorati (Clas. D)	5				
2 QUALITÀ DEL S.R.	12	23	(Vedi manuale)	24				
3 RESISTENZA CONVENZIONALE	13	24	Numero di piani N	25				
			Area totale coperta A_t [mq]	27				
			Area A_0 [mq]	41				
			Area A_p [mq]	44				
			τ_c [t/mq]	47				
			Alt. media interpieno h [m]	53				
			Peso specifico pareti p_w [t/mq]	55				
Carico permanente solai p_s [t/mq]	56							
4 POSIZIONE EDIFICIO E FONDAZIONE	14	26	Pendenza percentuale del terreno	59				
			Ruote Fondazioni: Sì	1	No	2		
			Terr. sciolto non sping. Fond. Sì	3	No	4		
			Terr. sciolto spingente Fond. Sì	5	No	6		
			Difesa. max. di quota Δh [m]	58				
5 ORIZZONTAMENTI	15	27	Piastrellati Sì	1	No	2		
			Orizzontamenti rigidi e ben collegati	31				
			Orizzontam. deformabili e ben collegati	2				
			Orizzontam. rigidi e mal collegati	3				
			Orizzontam. deformabili e mal collegati	4				
% Orizzontam. rigidi e ben collegati	32							
6 CONFIGURAZIONE PLANIMETRICA	16	28	Rapporto percentuale $\beta_1 = a/l$	33				
			Rapporto percentuale $\beta_2 = b/l$	34				
7 CONFIGURAZIONE IN ELEVAZIONE	17	29	% aumento (+) o diminuzione(-) di massa	35				
			Rapporto percentuale T/H	37				
			Percentuale superficie porticata	39				
			Piase terra porticata Sì	1	No	2		
8 D_{max} MURATURE	18	30	Rapporto massimo D_{max}	40				
9 COPERTURA	19	31	Copert. scie sp. α	3	poco sp.	1	sp.	2
			Cordoli in copertata Sì	1	No	2		
			Catene in copertata Sì	1	No	2		
			Carico perman. copert. p_c [t/mq]	57				
			Lungh. appoggio copert. l [m]	60				
Pertinetto copertata l [m]	62							
10 ELEM. NON STRUTT.	20	32	(Vedi manuale)					
11 STATO DI FATTO	21	33	(Vedi manuale)					

SCHEMI – RICHIAMI	
<p>Parametro 3. Resistenza convenzionale</p> <p>Tipologia strutture verticali τ_c [t/mq]</p> <p>Minimo fra A_0 ed A_p A [mq]</p> <p>Massimo fra A_0 ed A_p A [mq]</p> <p>Coef. $\alpha_0 = A_0/A_1$ Coef. $\gamma = B/A$</p> <p>$q^* = (A_0 + A_p)h$ poi $A_0 + p_s$</p> <p>$C = \frac{\alpha_0 \tau_c}{q^*} \sqrt{1 + \frac{q^* V}{1,5 \alpha_0 \tau_c (1 + \gamma)}}$</p> <p>$\alpha = C/0,4$</p>	<p>Parametro 6. Configurazione planimetrica</p> <p>$\beta_1 = a/l$ $\beta_2 = b/l$</p>
<p>Parametro 7. Configurazione in elevazione</p>	<p>Parametro 9. Copertura</p>