

TECNOLOGIE PER IL RECUPERO E IL RIFORZO
SISMICO DI STRUTTURE ABITATIVE IN

A D O B E

I N M E S S I C O

UN CASO STUDIO A IXCAMILPA
G U E R R E R O



Tecnologie per il recupero e il rinforzo sismico di strutture abitative in *Adobe* in Messico

Un caso studio a Ixcamilpa, Guerrero

Politecnico di Torino
Corso di Laurea Magistrale in Architettura per il Progetto Sostenibile
A.A. 2018/19

Tesi di Laurea Magistrale

<i>Relatore</i>	Daniela Bosia
<i>Correlatore</i>	Roberto Pennacchio
	Stefano Invernizzi
<i>Candidato</i>	Mattia Ruzza

A todos los caídos que perdieron la vida durante el sismo del 19s. Porque estas tragedias ocurren meno frecuentemente. Para todos los mexicanos que han demostrado unidad y comprensión en un momento difícil. Por mostrarme que a pesar del racismo global, hay un lugar donde las personas sienten curiosidad por conocer nuevas culturas. Ese lugar que comparte con nosotros los colores de la bandera nacional, pero no el miedo. Por hacerme sentir parte de ellos durante un año, *un tapatío*.

A tutte quelle persone che hanno perso la vita durante il terremoto del 19 Settembre. Perchè succedano sempre meno spesso queste disgrazie. Per tutto il popolo messicano che ha dimostrato unione e comprensione in un momento difficile. Per avermi dimostrato che malgrado i fenomeni di razzismo mondiali, esiste un posto in cui la gente è curiosa dell'incontro con nuove culture. Quel posto che condivide con noi i colori della bandiera nazionale, ma non la paura. Per avermi fatto sentire parte di loro durante un anno, *un tapatò*.

Nei sogni comincia la responsabilità.

William Butler Yeats

i

indice

A

abstract 10

P

premessa 14

O

introduzione

0.1 19 Settembre 18

0.2 Problemi e criticità per gli edifici 23

0.3 Zone sismiche della Repubblica 24

1

la terra cruda

1.1 Cenni generali 30

1.2 Distribuzione nel mondo 32

1.3 Perché costruire in terra cruda 37

1.4 Tecnologie costruttive 41

1.4.1 Adobe 41

1.4.2 Bauge 42

1.4.3 Colombage e terra-paglia 42

1.4.4 Pisé 44

1.4.5 Bahareque o quincha 44

1.4.6 Adobillo 46

1.4.7 Panderata 46

1.5 Diffusione della terra cruda in 47

Messico

2

costruzione di una *vivienda* in Messico

2.1 TKli 58

2.2 *Vivienda* 66

2.3 Workshop 69

2.3.1 Strumentazione utilizzata 72

2.3.2 Demolizioni 74

2.3.3 Consolidamento 77

2.3.4 Costruzione 81

2.3.5 Creazione degli adobe 90

2.3.6 Considerazioni sulla 95

vivienda

2.4 10 cause di cedimento 98

2.5 Elementi sismoresistenti 101

2.5.1 Fondazioni 101

2.5.2 Maglia strutturale 103

2.5.3 Aperture 104

2.5.4 Copertura 106

2.5.5 Catena superiore 108

2.6 Memoria fotografica

3

tecniche di rinforzo antisismico

3.1 Cedimenti strutturali 122

3.2 Rafforzamenti strutturali 125

3.2.1 Griglia di bambù 125

3.2.2 Applicazione di georeti 129

3.2.3 Griglia d'acciaio 131

3.2.4 Griglia lignea 133

3.2.5 Maglia in juta 136

3.2.6 Rinforzi lignei angolari 138

3.2.7 Rinforzo angolare con 141

4**metodi di calcolo sismico**

4.1	Cenni sui terremoti	
4.1.1	Perchè avviene un sisma?	146
4.1.2	Dove e quando?	150
4.1.3	Magnitudo e intensità	152
4.1.4	Scosse sismiche	155
4.1.5	Movimento del terreno	157
4.1.6	Natura delle forze sismiche	159
4.2	Fattori negativi	160
4.2.1	Peso proprio dell'edificio	160
4.2.2	Periodo di vibrazione	161
4.2.3	Smorzamento del materiale	163
4.2.4	Spettro di risposta	164
4.2.5	Duttilità	166
4.2.6	Forze agenti	167
4.3	Caso Ixcamilpa	171
4.3.1	Ribaltamento composto di parete	172
4.3.2	Flessione orizzontale di parete.	178

O**conclusioni**

o.4	Conclusioni	192
o.5	Riferimenti Bibliografici	194
o.6	Ringraziamenti	206

C/S/E**calcoli / schede / elaborati**

C1	- Calcoli per il ribaltamento composto di parete	210
C2	- Calcoli per la flessione orizzontale di parete	215
S1	- ECOVERNET J500 XL	218
S2	- TENAX GIGAN	219
S3	- TENAX LABOR	220
S4	- TENAX 3d GRID	221
E1	- Inquadramento territoriale Messico	224
E2	- Inquadramento territoriale Ixcamilpa de Guerrero	225
E3	- Inquadramento territoriale El Organal	226
E4	- Pianta delle Coperture _ Ante progetto	227
E5	- Pianta delle Coperture _ Post progetto	228
E6	- Pianta pian terreno _ Ante progetto	229
E7	- Pianta pian terreno _ Post progetto	230
E8	- Sezione AA _ Post progetto	231
E9	- Sezione BB _ Post progetto	232
E10	- Prospetto Sud _ Post progetto	233
E11	- Prospetto Est _ Post progetto	234
E12	- Prospetto Nord _ Post progetto	235

Nella seguente tesi di Laurea si è riportata l'esperienza di costruzione di un piccolo edificio in terra cruda, in una zona ad alto livello di sismicità, ad Ixcamilpa de Guerrero, in Messico. Tale abitazione è stata ricostruita nell'Agosto del 2018, a seguito dell'evento sismico avvenuto il 19 Settembre del 2017 nello stato di Puebla. La ricostruzione è avvenuta grazie ai fondi di una associazione privata, con l'aiuto di un team composto da studenti universitari messicani, portoricani e l'autore della suddetta tesi.

Viene quindi presentata nel capitolo 2 la modalità di ricostruzione dell'edificio mediante la tecnica tradizionale in adobe. Durante questa fase si è rinforzata la struttura tramite l'utilizzo di barre d'acciaio, in corrispondenza degli angoli e per collegare le pareti di nuova costruzione con quelle non crollate a seguito del sisma; inoltre è stata ampliata la *vivienda*, aumentando la superficie calpestabile a disposizione degli inquilini. In seguito a questa fase, si sono analizzate le criticità della struttura. Avendo rilevato alcune problematiche a livello progettuale si è cercato di trovare una soluzione

che potesse migliorare la risposta sismica dell'edificio, tenendo sempre in considerazione il nostro caso studio.

Nel capitolo 3 si è effettuata una fase di ricerca, durante la quale si sono analizzati tutti quei sistemi di irrigidimento strutturale che potessero essere applicati alla nostra struttura, la quale risultava già edificata. In seguito a tale ricerca, ci si è trovati a dover affrontare tre grandi vincoli: lo stato attuale dell'opera, il contesto e la sostenibilità ambientale. Di tutti gli irrigidimenti strutturali analizzati, si è scelto di approfondire quello che riguardava l'impiego di una geomaglia all'interno della malta di finitura, vista la facilità di posa in opera per un edificio già realizzato.

I tre vincoli sono stati quindi il fulcro per l'avanzamento della proposta finale. Ixcamilpa purtroppo è un luogo lontano da una grande città, popolato da gente umile che non possiede particolari risorse economiche. L'idea è stata quella di proporre un metodo di irrigidimento simile a quello della georete, ma con una maglia di juta, un materiale naturale, dal basso impatto ambien-

tale, economico e facilmente reperibile.

Nel capitolo 4 della tesi si è potuto analizzare, attraverso i metodi di calcolo, l'apporto statico per il quale la maglia contribuisse. Visti i risultati preliminari, ci si può ritenere soddisfatti. La maglia in juta garantisce un comportamento discreto. La facilità d'applicazione coadiuvata dal prezzo contenuto e dalla facile reperibilità ne fanno una soluzione adeguata per il caso studio messicano.

In this master thesis the construction of a small rammed earth building is described: it is located in an high seismicity area, situated in Ixcamilpa de Guerrero, México. This house was rebuilt in July 2018, following the seismic event that took place on September 19, 2017 in the State of Puebla. The rebuilding took place thanks to donations and with the reconstruction work of a team composed by Puerto Rican, Mexican and Italian architecture students.

In the chapter 2 the method of reconstruction is presented. During this phase the structure was strengthened through the use of steel bars, in correspondence of the corners, and in order to connect the newly built walls with those that did not collapse during the earthquake; the vivienda has been expanded too, in order to increase the common space of the family. Then we analyzed the critical aspects of the structure. After having noted some problems at the design level, we tried to find a solution that could improve the seismic response of the building, always by taking our case study into consideration.

In chapter 3 a research phase was carried out, during which all the structural stiffening systems that could be applied to our structure were analyzed, which was already built. After this research phase, we have to face three major constraints: the current state of the work, the context and the environmental sustainability. Of all the structural stiffeners analyzed, it was decided to investigate the one concerning the use of a geogrid inside the finishing mortar, given the ease of installation on a building already built.

The three constraints were the goal to the progress of the final proposal. Ixcamilpa unfortunately was a place far from a big city, populated by humble people. The idea was to propose a method of stiffening similar to that of geogrid, but with a jute fabric: a natural material, with low environmental and economic impact, that is also easily available.

In the chapter 4 of the thesis, through the calculation methods, we calculate the static contribution of the jute fabric. Given the

preliminary results, we can be satisfied. The jute fabric guarantees a discreet behavior. The ease of application, the low price and the easy availability make the jute fabric an adequate solution for our case study.

P *Premessa*

Durante l'A.A. 2017-2018 ho avuto modo di frequentare i corsi del mio ultimo anno di Architettura per il Progetto Sostenibile in un'Università messicana, grazie al programma Erasmus. Questa università era la UDLAP, *Universidad de las Americas Puebla*, sita a Cholula: città dove si trova una delle più grandi piramidi Azteche presenti sul pianeta, ed a pochi chilometri dalla capitale dello stato di Puebla.

Nell'anno passato in Messico ho conosciuto persone provenienti da tutto il mondo, assaporato la cucina tipica e scoperto posti fantastici; didatticamente parlando, è stato un anno intenso e mi sono dovuto scontrare con metodi di studio e valutazione completamente differenti dai nostri. Ma è stato stimolante e mi ha spronato costantemente, fino al raggiungimento di risultati soddisfacenti. In ultimo, ho potuto apprezzare la cultura latina, e nella fattispecie quella messicana: questo è stato il motivo trainante per la scelta del mio Erasmus. Infatti ciò che a me incuriosiva più di tutto era poter conoscere una nuova cultura, nuove tradizioni, nuove architetture vernacolari.

L'apice della mia esperienza oltreoceano è

stato raggiunto quando grazie alla Prof.ssa Daniela Bosia e al Prof. Roberto Pennacchio è stato possibile partecipare ad un workshop basato sulla ricostruzione di una *vivienda* in terra cruda vicino all'epicentro del terremoto avvenuto il 19 Settembre 2017. Catturato dall'entusiasmo e dalla malinconia a causa dell'evento che aveva coinvolto la nazione messicana, e che anche noi avevamo vissuto in prima persona, ho accettato subito la proposta. Grazie alla mediazione del Prof. Alvaro Lara, responsabile del team di ricostruzione della *vivienda*, il 16 Luglio 2018 abbiamo iniziato la ricostruzione del fabbricato.

Tornato al Politecnico di Torino si è potuto analizzare come l'intervento di ricostruzione non abbia sopperito ad alcune mancanze a livello antisismico, le quali avrebbero donato al progetto un plusvalore per la sicurezza degli inquilini. Si è quindi pensato di introdurre un metodo di rinforzo basato su di una maglia di juta annegata nella malta di finitura. Questa tecnica approfondita con il Prof. Invernizzi Stefano ha dato i risultati sperati, potendo quindi ritenersi soddisfatti della soluzione elaborata.

O

introduzione

0.1 19 Settembre

Il 19 settembre 2017, alle ore 13:14 (UTC -6), un terremoto, di magnitudo 7.1 sulla scala Richter, si scatena a una profondità di 57 km tra gli stati di Puebla e Morelos, a 150 km da Città del Messico **(1)**. Insieme, con il precedente terremoto del 7 settembre, molti edifici vernacolari in tutta l'area messicana crollarono o vennero catalogati come inagibili. Lo stato maggiormente danneggiato fu Oaxaca, con un totale di 63.336 abitazioni colpite di cui, 21.823 inagibili; nello Stato di Città del Messico si contarono danni a 5.765 case, 2.273 delle quali inagibili; 59.397, 27.812, 15.352 case furono distrutte rispettivamente nello stato di Chiapas, di Puebla e di Morelos **(T1)**. Complessivamente si stimano in tutto il Messico danni per 48 mila milioni di pesos (221 milioni di euro) (*Instituto Belisario Domínguez, 2017*).

Lo stesso giorno del 1985, un sisma di 8.1 sulla scala Richter, si scatenava a circa 120 km da Città del Messico danneggiava l'intero Stato Federale. Attraverso investigazioni, comparando l'energia sismica sprigionata, l' A_{\max} quantificata rispetto al

tipo di suolo, sono stati paragonati i danni provocati dai due terremoti.

Il sisma del 1985 liberò un'energia sismica 32 volte maggiore rispetto a quello del 2017; mentre, attraverso accelerografi e sismografi, si è calcolato che l'accelerazione orizzontale massima attesa al sito (A_{\max}), nei pressi della Cittadella Universitaria (CU), quartiere di Città del Messico, fu di 30 Gal¹ [cm/s²] nel 1985, la metà di quella misurata nel 2017 (57 Gal).

Nonostante gli epicentri dei due sismi non siano così tanto dislocati, il tipo di suolo su cui hanno agito risulta differente. Gran parte della capitale è edificata sopra ad un antico lago ed è dunque caratterizzata da un terreno argilloso, che non assorbe ma propaga, amplificando molto, i movimenti sismici: per esempio l'ampiezza di un'onda sismica con periodo di due secondi in una zona con questo tipo di terreno, comparata con suolo meno poroso, può arrivare ad essere fino a 50 volte maggiore. Può essere utile analizzare i risultati rilevati nei din-

¹ Unità di misura dell'accelerazione: pari all'accelerazione di 1 cm/s²; il simbolo è Gal. Da non confondere con gal (gallone nella cultura anglosassone).



1 ▲ Distanza delle principali città dall'epicentro del sisma avvenuto il 19 Settembre 2017.

T1 ▼ Edifici colpiti durante il sisma del 19 Settembre suddivisi per entità federativa.

STATI	CASE	
	DANNEGGIATE	INAGIBILI
Stato di Messico	6.059	2.468
Stato di città del Messico	5.765	2.273
Morelos	15.352	1.323
Puebla	27.812	3.214
Oaxaca	6.336	21.823
Chiapas	59.397	18.058
Tlaxcala	34	0
Guerrero	2.976	1.451
Veracruz	nd	0

torni della Segreteria delle Comunicazioni e dei Trasporti (SCT). La A_{\max} in questo sito fu di 91 Gal mentre nell'evento del 1985 si registrarono 160 Gal, quasi il doppio; questo ci fa capire come il terreno di Città del Messico sia particolare e come gli sforzi provocati da un terremoto influiscano in maniera differente nelle varie parti della città, rimanendo sempre e comunque molto più elevati nelle zone con terreno ad alta porosità. Un altro dato interessante è che i sismografi hanno registrato che l'ampiezza delle onde sismiche con periodo di oscillazione minore ai due secondi furono maggiori nell'evento del 2017 rispetto a quello del 1985 (si parla nell'ordine delle cinque volte maggiori). Successe invece il contrario con le onde con periodo maggiore dei due secondi, la cui ampiezza fu molto maggiore nel 1985, nell'ordine della decina di volte. Questo fa impressione se si pensa che il movimento del suolo fu paragonabile a quello di un terremoto di magnitudo 8 sulla scala Richter e che l'evento recente fu provocato dalla rottura di una falda geologica molto più piccola. L'effetto distruttivo dell'ultimo sisma è dovuto alla condizione

nel quale si trovava l'epicentro nell'evento del 1985, ovvero a ben 400 km di distanza dalla Capitale.

Gli effetti di un terremoto ricondotti a un edificio sono tutt'altro che di facile comprensione, poiché non necessariamente la A_{\max} è la forza che può portare al collasso la stabilità di un edificio. Giustappunto: onde sismiche con maggior periodo di oscillazione mettono a rischio strutture alte, mentre onde con periodo più corto danneggiano edifici più bassi. Per calcolare infatti i danni a cui una struttura è soggetta in un evento sismico viene presa in considerazione l'accelerazione spettrale. I valori ottenuti determinano l'accelerazione traslata al livello di massima altura dell'edificio; in questo modo si riescono a capire che forze vanno ad agire su edifici con altezze diverse tra loro.

L'accelerazione spettrale in CU, dove il terreno era meno poroso, per edifici da 1 a 12 piani fu di 119 Gal; in questo caso risultò due volte maggiore all'evento del 1985. Mentre i rilevamenti in SCT, quindi un terreno più poroso, per la stessa tipologia

di edificio furono di 188 Gal, ottenendo quindi dei risultati più simili al terremoto di magnitudo 8. Un'altra analisi per edifici più alti, dai 12 ai 20 piani registrarono un'accelerazione in CU di un 30% minore, ovvero di solo 60 Gal. Per la tipologia di terreno presente in SCT, invece, ci fu un'accelerazione da 1,5 a 4,9 volte maggiore; appunto nel 1985, alcuni edifici registrarono un'accelerazione fino a 760 Gal **(2)**. Un dato davvero impressionante se si pensa che l'accelerazione della gravità è pari a 981 Gal. A conclusione di ciò risulta quindi evidente che il terremoto del 2017 ha avuto un effetto disastroso su tutti quegli edifici dall'altezza compresa tra i 4 e 7 piani².

² UNAM (2017) '¿Qué ocurrió el 19 de septiembre de 2017 en México?'. Disponibile al seguente link: <http://ciencia.unam.mx/leer/652/-que-ocurrio-el-19-de-septiembre-de-2017-en-mexico->

1985

2017

MAGNITUDO



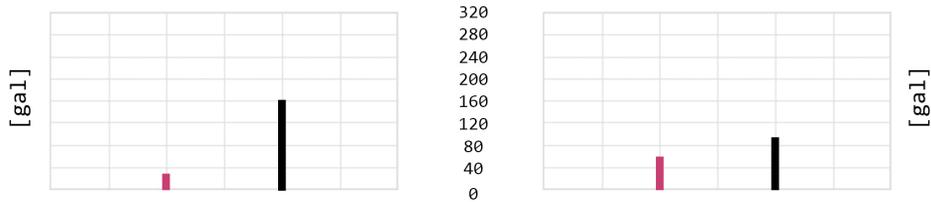
EPICENTRO



A_{max}

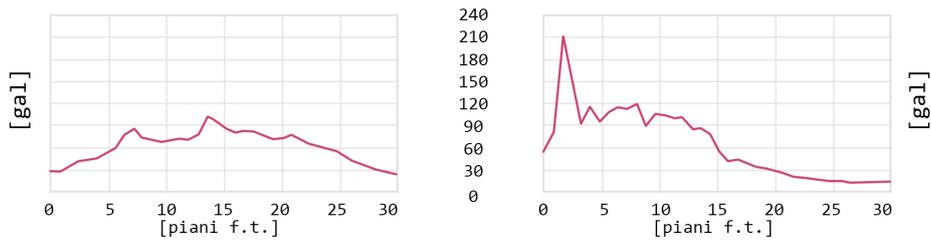
Suolo poroso

Suolo solido



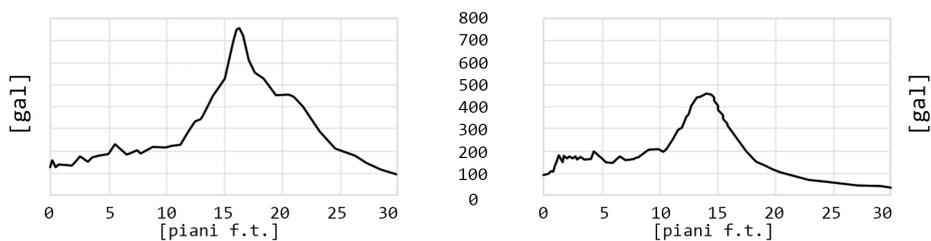
ACCELERAZIONE SPETTRALE

Suolo solido



ACCELERAZIONE SPETTRALE

Suolo poroso



2 ▲ Grafico comparativo tra i due terremoti avvenuti in Messico: quello del 1985 e quello del 2017.

0.2 Problemi e criticità per gli edifici

Nelle regioni propense a eventi sismici frequenti, la resistenza sismica dell'edificio è condizione imprescindibile per far sì che questo venga considerato di buona costruzione. La scelta del materiale adatto per la costruzione di un'architettura sismoresistente dipende molto dal luogo in cui si costruisce, il quale si porta dietro tutta una serie di elementi vernacolari, dalle disponibilità economiche ai materiali che offre il posto in cui si costruisce; nonché dalle conoscenze edilizie locali e dall'esperienza stessa della manovalanza, la quale nelle realtà dell'America Latina è spesso abituata a cimentarsi nell'autocostruzione della propria abitazione.

Le costruzioni in terra cruda hanno perso di credibilità nel panorama edilizio mondiale poiché viene oggi considerato come un materiale "povero"³ visto l'introduzione di nuovi materiali molto più resistenti agli sforzi sismici come il cemento armato (*Guerrero Baca, L. F., 2011*); e quindi altresì considerato pericoloso in caso di terremoti. Questa affermazione non è assolutamente vera,

come dimostra un censimento delle case affette dal sisma che nel 2001 colpì El Salvador⁴; questo documento evidenzia come le case in adobe non subirono una quantità di danni maggiori rispetto a quelle costruite in blocchi di cemento. Inoltre moltissime case in terra cruda sono tutt'oggi integre nonostante le abbiano colpite svariati terremoti (*Jaguaco Canchig, S. del Rocio, 2007*).

³ Luis Fernando Guerrero Baca, *Pasado y porvenir de la arquitectura de tapia*, Bitácora, 22, 2011, p.8.

⁴ Jaguaco Canchig, S. del Rocio (2007) *Uso del adobe como material de construccion*. Ecuador: p.29.

0.3 Zone sismiche della

Repubblica

La Repubblica federale messicana è divisa secondo 4 zone di sismicità (3):

- *Zona A*: è una zona dove di rado avvengono eventi sismici; non si sono infatti registrati terremoti importanti durante gli ultimi 80 anni ed inoltre l'accelerazione al suolo dovuta ad un sisma si stima superi di poco il 10% dell'accelerazione di gravità.

- *Zona B e C*: sono le due zone intermedie; i sismi sono più frequenti e le accelerazioni al suolo sono maggiori, non superando comunque mai il 70% dell'accelerazione di gravità.

- *Zona D*: è una zona dove si sono registrati i più forti eventi sismici, inoltre il ritorno sismico è elevato e l'accelerazione al suolo può superare anche del 70% quella di gravità.

Tra la placca tettonica *Nord Americana* e la *Placa de Cocos* si trova la *Brecha de Guerrero* (11); questa è una vera e propria breccia sulle coste dello stato di Guerrero. La *Brecha* è una faglia che si estende da Petatlàn fino a Pinotepa Nacional; si sa che è da circa 100 anni che questa faglia sta

raccogliendo energia elastica a causa dei moltissimi terremoti che avvengono. Gli studiosi non sanno nè come nè quando si possa liberare questa energia ma se dovesse succedere durante un unico evento sismico, probabilmente le cause sarebbero catastrofiche superando un magnitudo di 8 sulla scala Richter.

Allen Husker e **Luca Ferrari**, entrambi ricercatori dell'istituto di geofisica della UNAM⁵, hanno scoperto che al di sotto della *Brecha de Guerrero* (4) si trova una uno strato impermeabile di roccia ignea. Questa fa sì che quando le due placche tettoniche (quella del Nord America e quella di Cocos) si scontrino per subduzione, generando del liquido che rimane intrappolato e funge da lubrificante, si riduca la frizione tra le due falde e si eviti l'accumulo d'energia sufficiente per far detonare eventi tellurici regolari. Allo stesso tempo nella zona di interfase tra le due placche si ha la presenza di **terremoti lenti**. Questi generano uno spostamento lento che non provoca danni rilevanti e allo stesso tempo permette di li-

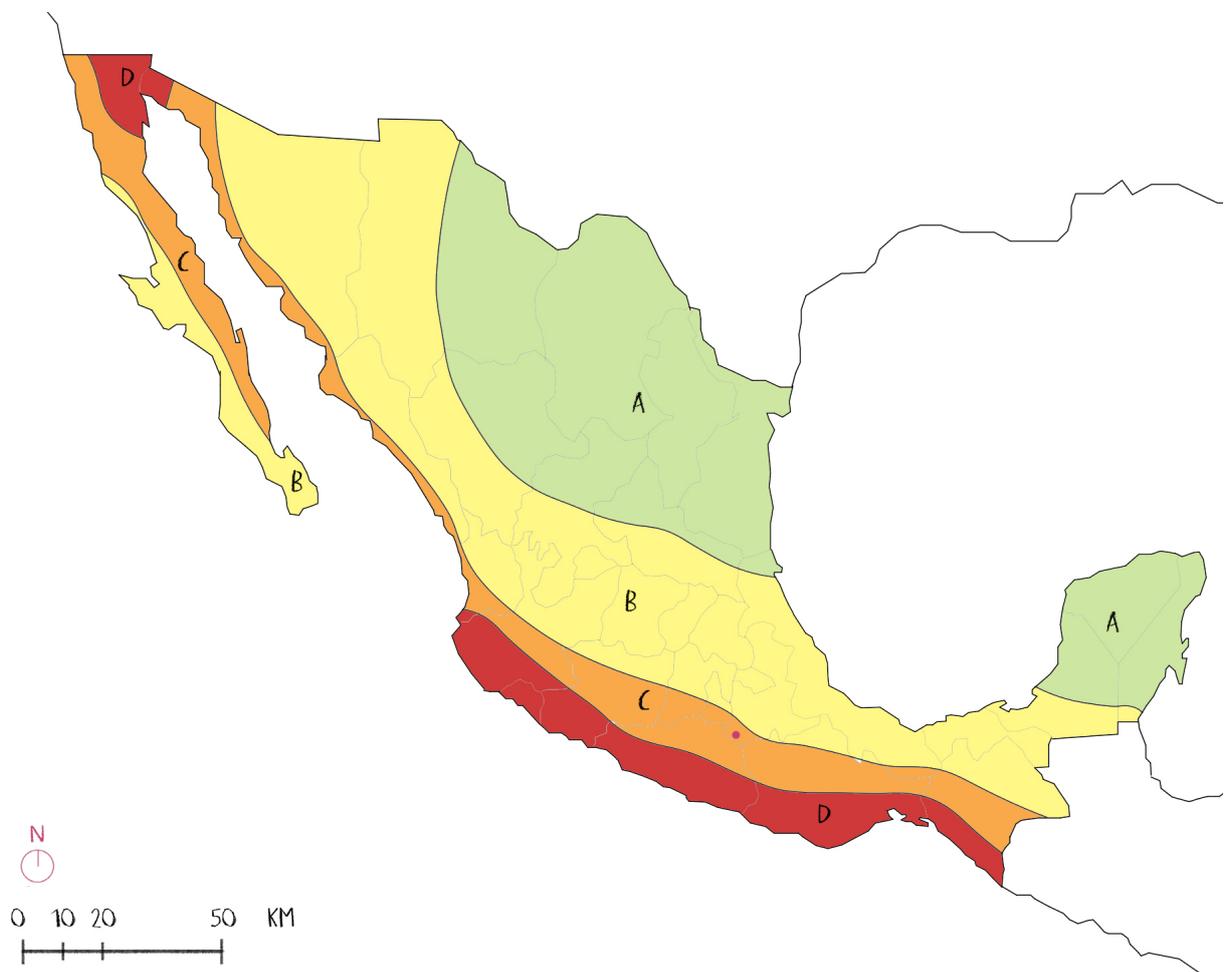
⁵ *Universidad Nacional Autónoma de México*, con sede a Città del Messico.

berare l'energia accumulata.

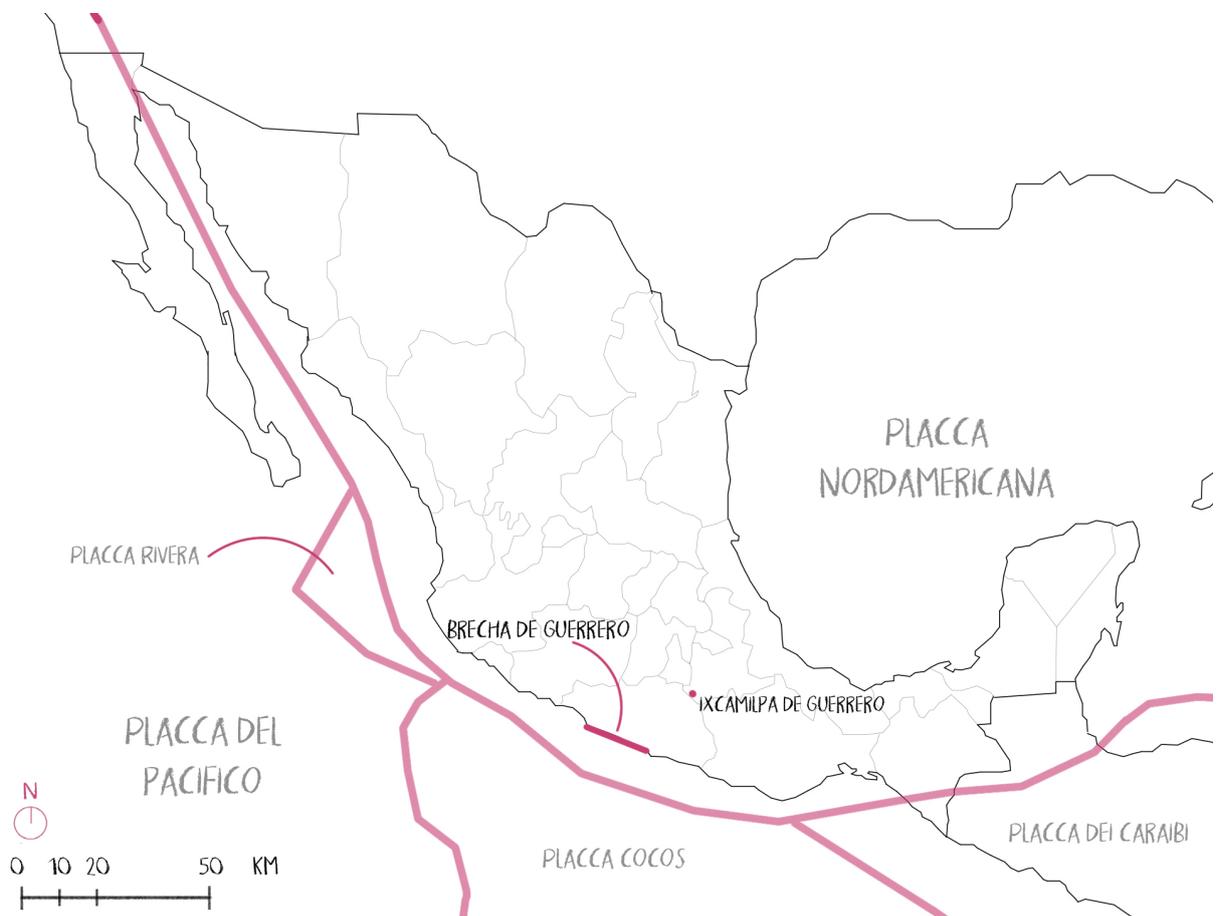
Secondo Husker quindi, i terremoti lenti avrebbero permesso all'energia accumulata dalla subduzione delle due placche di liberarsi in maniera graduale e senza generare un unico forte e devastante evento tellurico.

Tuttavia come sostengono alcuni studiosi tra cui il **Dr. Shri Krishna Singh**, dell'istituto di geofisica della UNAM, “*Oggigiorno non si sa quale delle due possibilità possa essere la più probabile*”⁶.

⁶ UNAM (2017) ‘¿Qué ocurrió el 19 de septiembre de 2017 en México?’. Disponibile al seguente link: <http://ciencia.unam.mx/leer/652/-que-ocurrio-el-19-de-septiembre-de-2017-en-mexico->.



3 ▲ Mappa delle zone sismiche messicane.



4 ▲ La Brecha de Guerrero.

1

La terra cruda

- 1.1** Cenni generali
- 1.2** Distribuzione nel mondo
- 1.3** Perché costruire in terra cruda
- 1.4** Tecnologie costruttive
 - 1.4.1** Adobe
 - 1.4.2** Bauge
 - 1.4.3** Colombage e terra-paglia
 - 1.4.4** Pisé
 - 1.4.5** Bahareque o quincha
 - 1.4.6** Adobillo
 - 1.4.7** Panderata
- 1.5** Diffusione della terra cruda in Messico

1.1 Cenni generali

La terra cruda è oggi il materiale edile più utilizzato nell'ambito costruttivo; ne fa da padrone la sua semplice reperibilità. Il 30% della popolazione mondiale abita infatti in case costruite in terra cruda⁷ (Bertagnin, M., 1999). Da quando l'uomo incominciò a costruire case, per ripararsi dal freddo e dalle intemperie, viene utilizzata la terra come materiale principale. Questo succede perché la materia è presente in grandi quantità in quasi tutte le zone della Terra.

La composizione chimica del terreno che si utilizzerà per costruire il nostro edificio è molto importante; normalmente in una manciata di terra ci si trova in presenza di diverse componenti naturali:

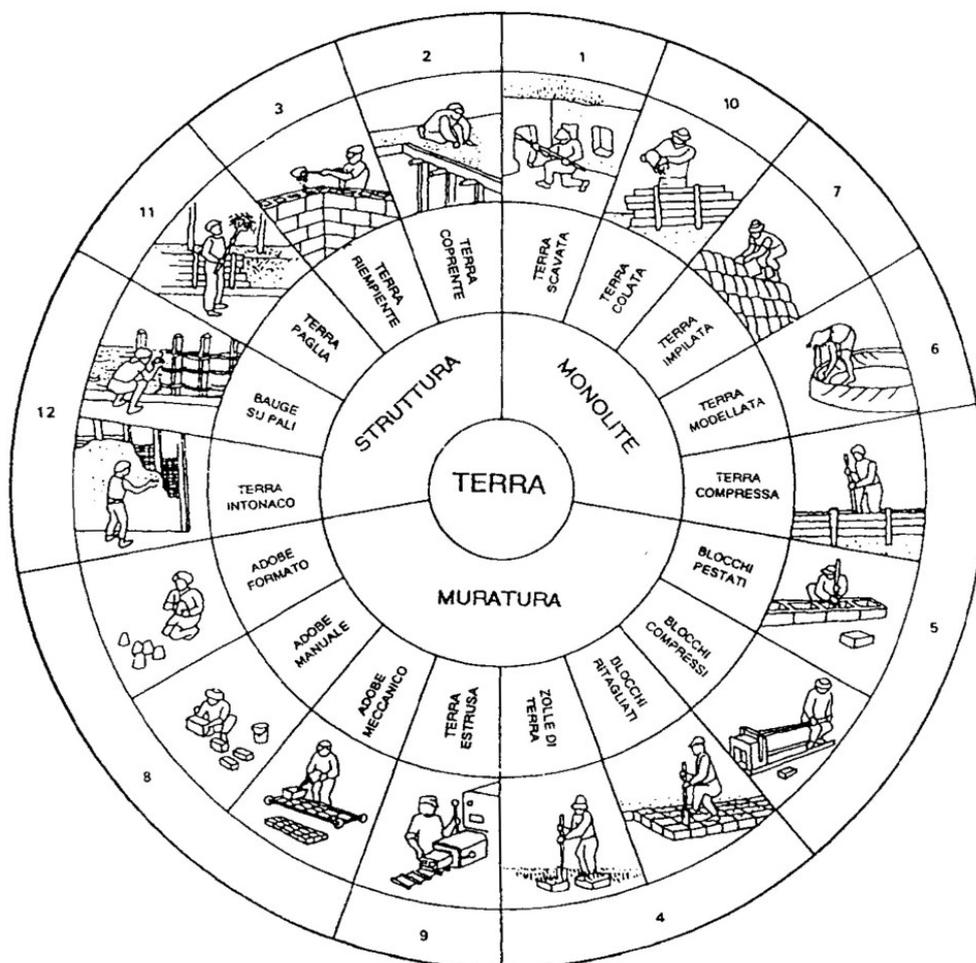
- *la ghiaia* che ha uno spessore compreso tra pochi millimetri ed il centimetro
- *la sabbia* la quale ha uno spessore che può arrivare fino ai 2 mm
- *il limo* con uno spessore che varia dai 2-4 μm ai 50-70 μm
- *l'argilla* che è la componente più piccola e

⁷ Bertagnin, M. (1999) *Architetture di terra cruda in Italia, tipologie, tecnologie e culture costruttive*, p.53.

risulta di circa diecimila volte più piccola rispetto alle dimensioni della ghiaia, con uno spessore al di sotto dei 2-4 μm

Tra tutte le componenti quella che gioca il ruolo di legante è l'argilla; quindi la sua quantità nell'impasto cambierà sensibilmente le caratteristiche fisiche del prodotto finale. In concordanza con la composizione chimica dell'impasto e con la cultura edilizia vernacolare del luogo in cui si costruisce ci si trova di fronte a ben 12 modalità di trattamento della terra per la costruzione dell'edificio. CRATerre⁸ si è occupata di raggruppare queste dodici modalità in un *quadro sinottico* che ci mostra la modalità di posa (5).

⁸ 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'IC-CROM (Centro Internazionale degli Studi per il Restauro e la Conservazione dei Beni Culturali) per la conservazione del patrimonio in terra dell'UNESCO.



5 ▲ Quadro sinottico delle costruzioni in terra cruda di CRATerre. Immagine disponibile al seguente link: <https://www.pinterest.ca/pin/477522366723381159/>.

1.2 Distribuzione nel mondo

Le due mappe mostrano rispettivamente le zone in cui sono presenti edifici in terra cruda (6) (Bertagnin, M., 1999) e la distribuzione della popolazione mondiale (7). Facendo un breve confronto si può notare come gli edifici si distribuiscano omogeneamente in una determinata zona climatica: tra il Tropic del Cancro e il Tropic del Capricorno, esattamente nella zona equatoriale.

Come si può notare (8), infatti, la presenza di edifici in terra cruda in Europa è minore rispetto al resto del Mondo; questo perché il nostro clima è temperato: le escursioni termiche giornaliere sono contenute, così come l'umidità risulta stabile nell'arco della giornata. In alcuni continenti, sebbene il tipo di clima sia indicato per ospitare edifici in terra cruda, non vi è presenza di essi. Questo probabilmente è da ricondurre ad un fattore geografico, a causa del quale il clima risulta ostile per l'essere umano: vedi il deserto del Sahara, la Foresta amazzonica, Il Deserto del Gobi, il Tibet, la Groenlandia e la Siberia. In questi luoghi, appunto per il clima ostile alla sopravvivenza umana e per

il disinteresse nel popolare aree così ampie, le costruzioni in terra cruda e più in generale, le costruzioni edili non esistono o sono presenti in numero molto ridotto.

Le zone che ospitano la maggior parte degli edifici in terra cruda sono quelle comprese tra l'America del Sud e l'Africa Centrale, senza tralasciare parti del Continente asiatico: come India e Indonesia. C'è però anche una forte concentrazione di architetture in terra cruda in quelle zone che presentano un clima desertico: come per esempio le zone dell'Africa del Nord, le zone della penisola Arabica, assieme ad alcune zone australiane e del continente asiatico.

La presenza di queste architetture in zone tropicali e desertiche non deve sorprendere. Lo dimostra un'analisi (Gernot, M., 2005) condotta dall'architetto **Fathy** al Cairo nel 1986 sul *time-lag*⁹, il quale mette in diretto confronto un edificio in terra cruda con uno in cemento armato.

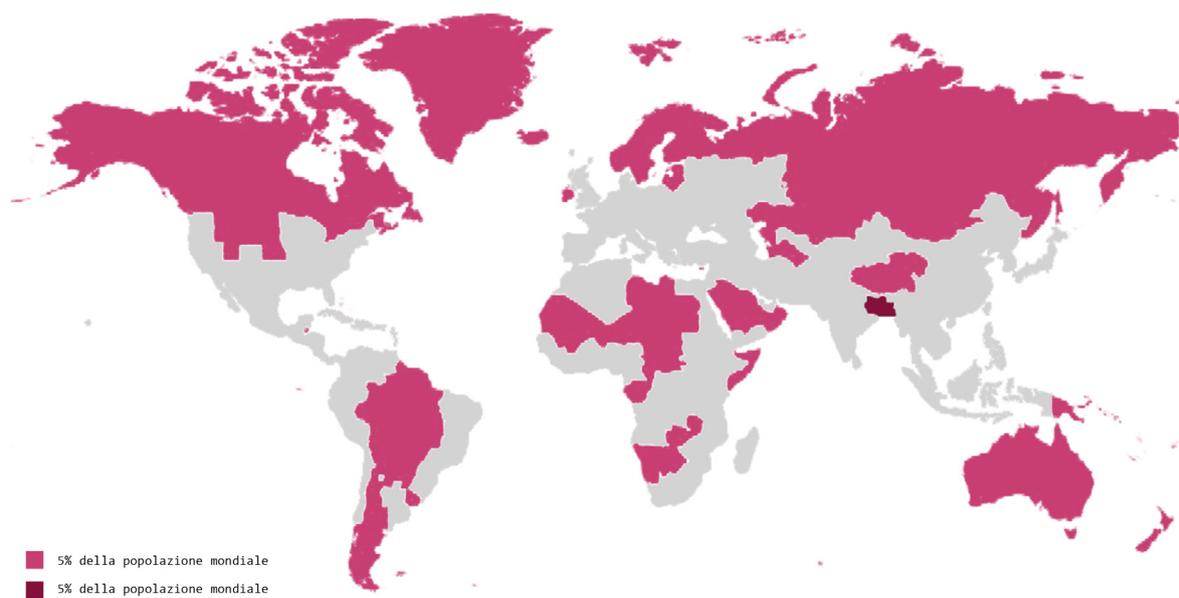
L'edificio in terra cruda ha uno spessore

⁹ Il *time-lag* è la quantità di tempo che impiega l'ambiente interno a raggiungere la medesima temperatura esterna. Un muro con un'alta capacità di conservazione del calore al suo interno avrà un periodo di *time lag* molto elevato.

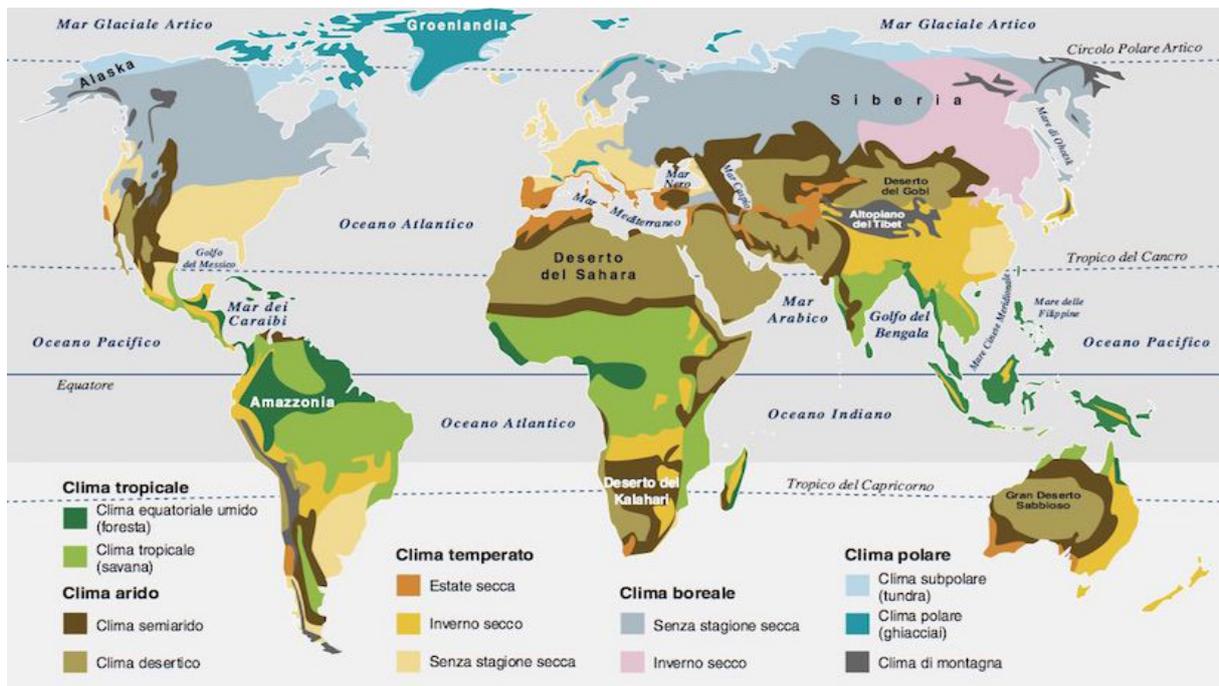
ARCHITECTURE DE TERRE DANS LE MONDE



6 ▲ Distribuzione degli edifici in terra cruda secondo i dati di CRATerre. Immagine disponibile al seguente link: http://craterre.org/galerie-des-images/default/gallery/38/gallery_view/Gallery/ctl/galerie-des-images/default/gallery/38/gallery_view/Gallery.



7 ▲ Distribuzione della popolazione mondiale, in grigio è rappresentato dove vive il 90% della popolazione mondiale. Immagine disponibile al seguente link: <https://www.focus.it/cultura/curiosita/la-distribuzione-della-popolazione-mondiale>.



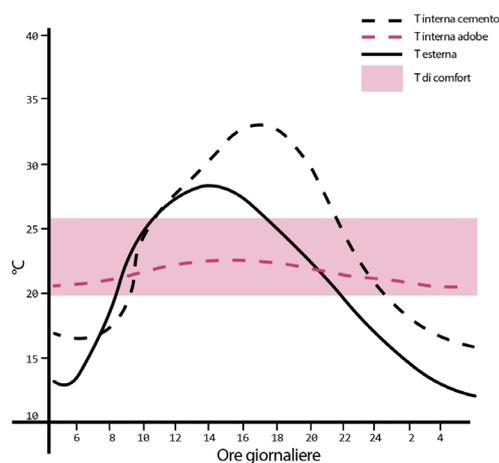
8 ▲ Mappa climatica globale. Immagine disponibile al seguente link: <https://www.tomveelers.nl/cartina-del-mondo-con-zone-climatiche>.

totale del muro di 50 cm e presenta una chiusura orizzontale con un sistema di volta a botte; quello in cemento, invece, ha uno spessore del muro di soli 10 cm composto da lastre prefabbricate e un tetto piano, sempre in cemento.

Si è rilevato che durante la fase giornaliera, quando lo sbalzo di temperatura era di 13 °C: la temperatura interna della casa in terra cruda differiva solamente di 4 °C; nell'edificio in cemento invece la temperatura interna variava di 16 °C rispetto all'esterno; praticamente una differenza di temperatura 4 volte maggiore rispetto all'edificio in crudo. Alle quattro del pomeriggio si registrarono temperature all'interno della casa in cemento maggiori rispetto all'esterno di 5 °C; mentre alla stessa ora nella casa in terra la temperatura era minore rispetto all'esterno di ben 5°C (9).

In zone del pianeta dove si raggiungono forti escursioni termiche le quali generano un pessimo ambiente di vivibilità interna (solitamente con delta termici compresi tra i 18 e 28 °C), è di primaria necessità avere un muro con un alta capacità di trattenimento

del calore. Ovviamente il *time-lag* incide moltissimo sul comfort interno della casa ma oltre a questo, incide anche sulla variazione dell'umidità interna e la creazione di condensa che può portare alla creazione di funghi e batteri dannosi per i nostri edifici ma, ancor di più, per la nostra salute.



9 ▲ Diagramma di comparazione tra la T di un abitazione in cemento ed una in terra cruda. Rielaborazione grafica di Gernot Minke, *Manual de construcción en Tierra*, Editorial Fin de Siglo, 2005, p. 32.

1.3 Perché costruire in terra

Si è descritto dove si è costruito in terra cruda e si è visto che esiste una diretta connessione tra le architetture in terra cruda e il clima dell'ambiente circostante. Molto spesso la grande diffusione di questo tipo di tecnologia è connessa ad una mancanza di risorse economiche tali da sopperire all'utilizzo di altri materiali architettonici, prediligendo una messa in opera di tipo autocostruttivo e quindi, senza le conoscenze adeguate da parte del costruttore. Fatta questa breve premessa andiamo a vedere quali sono i principali pro e contro nella costruzione di un edificio in terra cruda.

È molto semplice costruire un edificio in terra cruda, quindi le persone anche con scarse capacità manuali non avranno difficoltà nel cimentarsi nella costruzione della propria casa. Anche se sono previste nozioni edilizie, con l'aiuto di una persona più esperta si apprenderà in maniera molto facile a costruire la propria casa, ovviamente assistendo ad una breve spiegazione iniziale e mettendo in conto che bisogna sbagliare per poter imparare in maniera corretta.

Le principali peculiarità positive di questo

materiale possono essere che (Scudo, G., Narici, B., Talamo, C., 2001):

- È un'architettura che da sempre fa parte della cultura vernacolare, quindi molti individui ancora hanno piacere nel vivere una casa come quella dei propri nonni. Si mantiene quindi viva l'identità del sito in cui si costruisce la propria dimora.
- È un'architettura dal prezzo relativamente economico. Se si costruisce vicino ad un sito dove si può estrarre direttamente la materia prima, ovvero la terra, si può abbattere drasticamente il prezzo della materia prima, e quindi considerare solamente i costi della manodopera per la creazione dell'impasto e della messa in opera.
- È un'architettura sostenibile, se si prende in considerazione il suo *lca*¹⁰, e quindi la valutazione del costo di estrazione, trattamento, fabbricazione, trasporto, uso/riuso/riciclo e

¹⁰ *Life Cycle Assessment*, ovvero l'impatto ambientale di un materiale dalla sua fabbricazione al suo smaltimento, citato per la prima volta nella normativa europea ISO 14040 del 2006.

smaltimento. Per quanto riguarda la creazione degli adobe o del pisè: non utilizzando macchinari idraulici non si genera CO². Ed infine si può considerare che il materiale frantumato e trattato nuovamente possa essere reimpiegato senza perdere le sue caratteristiche iniziali. Come mostra il grafico infatti il mix 5 **(10)**, ovvero il suolo naturale senza alcuna componente di cemento risulta quello che ottiene i risultati di lca complessivamente minori (*Minke, M., 2005*).

- Come detto prima la terra ha un'elevata capacità di immagazzinare il calore e l'umidità e rilasciarla gradualmente durante la giornata, garantendo così una percezione di comfort interno piacevole. Questo perché la struttura della muratura in terra cruda è di tipo poroso. È dotata di un time lag ottimo, generando quindi una condizione di benessere in tutti gli ambienti interni.

Di contro invece la costruzione in terra cru-

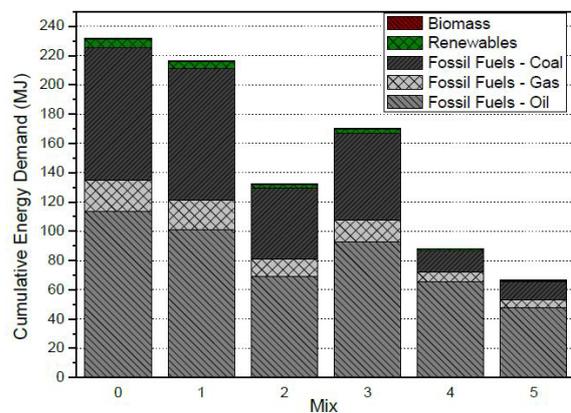
da ha i seguenti limiti:

- Essendo maggiormente diffusa in paesi con scarse capacità economiche si ricorre spesso all'autocostruzione. Ciò implica che gli attori che costruiscono una casa in terra cruda, i quali spesso sono gli stessi inquilini, non abbiano le capacità adeguate per costruire un edificio con canoni di sicurezza adeguati.
- Essendo un'architettura vernacolare si è persa l'esperienza e la conoscenza del sistema costruttivo che potevano avere gli antenati. Questo capita soprattutto in luoghi dove ci si è approcciati durante gli anni con altre tecnologie costruttive, le quali sono state sponsorizzate da privati e dallo Stato stesso come maggiormente durature e sicure. È il caso dei blocchi di cemento o le strutture combinate con pilastri in cemento armato e mattoni di argilla cotti.
- È un materiale che ha una bassa compatibilità con altri materiali edilizi. Per la stessa motivazione

antecedente spesso si affiancavano a strutture esistenti in terra cruda pilastri di cemento armato, con la convinzione di irrigidire l'intera struttura. Questo è un errore molto grave poiché terra cruda e cemento non collaborano bene sotto l'effetto di un sisma: i due materiali si trovano a vibrare con frequenze diverse. La parte cementizia della struttura, che possiede un peso maggiore rispetto a quello della terra, sbatte prepotentemente sulla terra cruda di fatto sgretolandola e rendendo così l'intera struttura insicura.

- È un materiale che ha molte limitazioni sia in pianta che in prospetto. È buona norma per gli edifici in terra cruda avere una pianta il più regolare possibile e di forma quadrata o, ancora meglio, circolare; inoltre non si possono realizzare molte aperture ed è necessario che esse non siano troppo ravvicinate tra loro. Inoltre ha delle limitazioni a livello di altezza in caso sismico. Esistono tuttavia in Germania case in terra

cruda dall'altezza di 5 piani fuori terra (11). Sono comunque casi isolati e solitamente le costruzioni in terra cruda non superano quasi mai i due piani fuori terra.



10 ▲ Tabella che mostra il consumo in MJ dei vari mix di terra testati. A. Arrigoni, D. Ciancio, C.T.S. Beckett, G. Dotelli, *Improving rammed earth building's sustainability through life cycle assessment (lca)*, 2016, p. 4.



Figura 7 - Abitazione a Weilburg, Germania. Gernot Minke, *Manual de construcción en Tierra*, Editorial Fin de Siglo, 2005., p. 18.

1.4 Tecnologie costruttive

1.4.1 Adobe

La parola adobe era conosciuta già ai tempi della civiltà egiziana, la quale utilizzava il nome di *thobe*; le popolazioni arabe invece lo chiamavano *ottob*. Il nome cambiò infine in *adobe* per merito degli spagnoli (*Bertagnin, M., 1999*).

Nella tradizione la preparazione dell'adobe avviene creando un impasto di terra assieme a paglia o altre fibre vegetali, poi riversato in forme di legno diverse a seconda della dimensione del mattone che si vuole ottenere. I mattoni prodotti vengono successivamente stoccati e lasciati essicare al sole per un periodo che può variare da uno a tre mesi, in un ambiente non a diretto contatto con la luce solare, per far sì che non si crepino. Non esiste una dimensione precisa del blocco di terra cruda, ma piuttosto varia da zona a zona; questo vale anche per gli stampi in cui viene riversata la miscela: se ne possono trovare di singoli, doppi e, in alcuni casi, anche capaci di contenere fino a 16 mattoni. Normalmente la forma più logica è quella rettangolare con un rapporto tra i due lati pari a 1:2, mentre l'altezza è sempre intorno ai 8-10 cm. In alcune regioni africane però è

possibile scontrarsi con mattoni dalla forma prismatica; perlopiù perché presentano una maggior facilità in fase di creazione che, in questo caso, avviene senza l'ausilio di uno stampo.

Anche all'epoca dei Greci era utilizzata la terra cruda tant'è che esiste un aneddoto raccontato da Vitruvio, nel quale afferma che le mura di Atene erano state costruite in terra cruda e solo dopo rivestite da un altro strato di lastre di pietra.

A riprova di questa citazione vitruviana si conosce una classificazione tipologica di mattoni in terra cruda stilata proprio dall'antica civiltà greca:

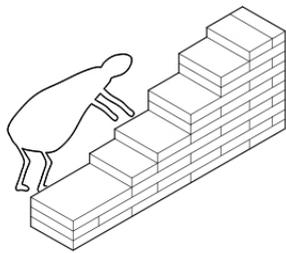
- Mattone della Lidia, con tre differenti misure: 50x33x8 cm; 45x26x10 cm e 39x19x10 cm.
- Pentadoron, occupato per lo più per la costruzione delle opere pubbliche della dimensione di 45x45x8 cm.
- Tetradoron, occupato prevalentemente negli edifici ad uso abitativo della dimensione di 30x30x10 cm.

1.4.2 Bauge

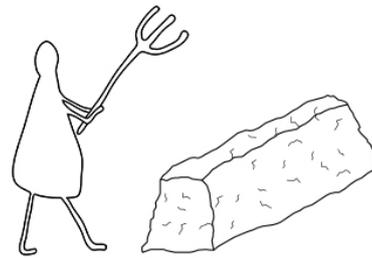
Questa tecnica è molto diffusa in Europa, soprattutto in Francia e Inghilterra. Si crea con terra e fibre vegetali, quasi sempre paglia; le fibre sono presenti in ragione di circa 25 kg/mc. È doveroso trovare la giusta plasticità dell'impasto per la corretta messa in opera. Questo perché per l'applicazione di questa tecnica è necessario stendere corsi sovrapposti di impasto (preparato generalmente con l'impiego di una forca). Dopo il completamento di alcuni corsi viene utilizzata una pala per l'asportazione delle imperfezioni, per fare in modo di mantenere una corretta orrizontalità del prodotto finale (Bertagnin, M., 1999).

1.4.3 Colombage e terra paglia

Nella tradizione della terra cruda non è insolito trovarsi di fronte alla fusione della tecnica in terra associata a quella del legno. Nel caso del *colombage* la terra viene usata come semplice riempimento; esiste quindi una struttura lignea che è a vista e successivamente riempita; questa tipologia di edifici è comune nella regione dello champagne francese. La tecnica della *terra paglia* è invece forse la più interessante per il forte comportamento antincendio; infatti l'impasto viene compattato in maniera minuziosa all'interno di casseformi, che successivamente verranno asportate (Bertagnin, M., 1999). Il prodotto finale che si ottiene è simile a quello ottenuto dalla tecnica del *pisé*.

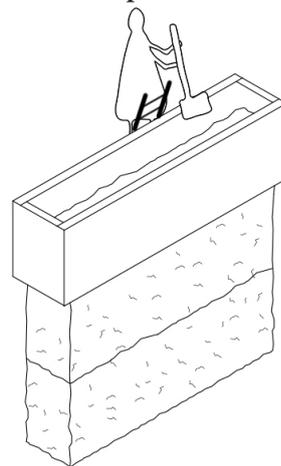


▲ **Tecnica costruttiva con blocchi di adobe.**



▲ **Tecnica costruttiva del pan de boise.**

▼ **Tecnica costruttiva del pisè.**



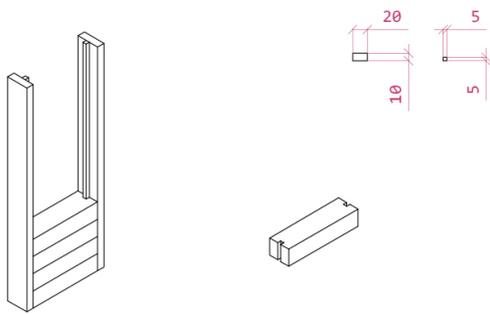
1.4.4 Pisé

Il pisé è la tecnica costruttiva attraverso la quale è possibile costruire una casa con della terra, senza il sostegno di alcuna armatura lignea e senza l'impiego della paglia nell'impasto. *“Questa tecnica consiste nel battere della terra appositamente preparata, corso dopo corso, dentro una cassaforma mobile lignea, larga quanto lo spessore del muro che si intende costruire.”*, così scrisse **François Cointreaux**. Una volta battuta la terra si compatta fino a raggiungere l'altezza desiderata; il pisé acquista quindi solidità attraverso il processo di compattazione che ne diminuisce il volume e sopprime la presenza d'aria. La compattazione avviene per mezzo di una mazza o un pestello di legno che può avere forma e dimensioni differenti a seconda della zona in cui viene prodotto il pisé. Per la realizzazione del suddetto metodo sono necessarie vanghe, zappe, badili, carriole e le casseforme che hanno generalmente la medesima dimensione: dai 50 ai 90 cm di altezza, dai 100 ai 120 e ancora dai 150 ai 200 di lunghezza (Bertagnin, M., 1999).

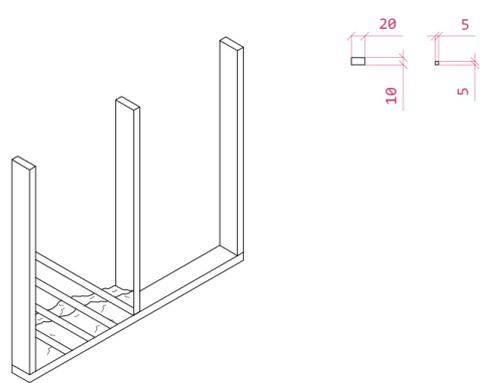
1.4.5 Bahareque o quinchá

Questa tipologia di costruzione in terra cruda è comune in alcuni paesi dell'America Latina. Consiste nel creare una vera e propria maglia strutturale lignea la quale successivamente sarà riempita con la miscela di terra paglia e acqua. La maglia strutturale è formata da pilastrini a forma rettangolare dalla dimensione di 2"x4" e da travetti quadrati dalla dimensione di 1", disposti in orizzontale o in obliquo.

I vantaggi di questa tecnica sono che si riesce a creare un sistema flessibile agli sforzi prodotti da un terremoto; mentre lo svantaggio è che dopo aver riempito tutta la struttura con terra spesso appaiono crepe, dovute al fatto che il rivestimento esterno (ovvero quello che viene applicato sopra ai travetti posti in posizione obliqua) non ha uno spessore sufficiente e tende a creparsi (Riviera Vidal, A., 2013). Inutile dire che da queste crepe può penetrare acqua piovana la quale può deteriorare la struttura e gli elementi lignei, oltre che favorire un attacco da parte delle termiti da terra.

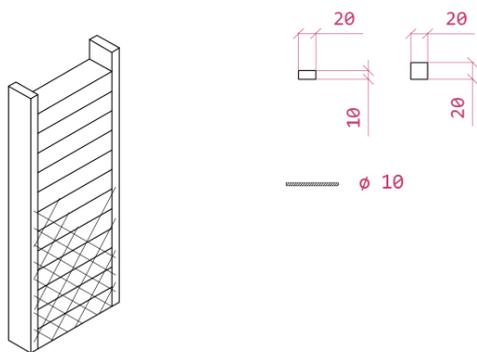


▲ **Tecnica costruttiva dell' adobillo.**



▲ **Tecnica costruttiva del bahareque.**

▼ **Tecnica costruttiva del pandereta.**



1.4.6 Adobillo

È una tecnica utilizzata nel Sud America e funziona tramite l'incastro di un blocco di terra sagomato all'interno di un telaio in legno. La struttura lignea è verticale ed è formata da due travetti uno a forma rettangolare dalle dimensioni di 4"x6" mentre una parte quadrata dalle dimensioni di 1"x1". Il blocco di terra cruda invece presenta una forma rettangolare dalle dimensioni di 50x15x10 cm, con un invito quadrato sul lato corto dalle dimensioni di 1"x1". I blocchi vengono quindi inseriti dall'alto verso il basso; questa tecnica permette di facilitare la posa dei blocchi ed inoltre evitare che il muro possa presentare degli spiacevoli fuori piombo, grazie alle guide date dalle travi (Riviera Vidal, A., 2013).

1.4.7 Panderata

Questa modalità è simile alla precedente: la struttura verticale è composta da travetti dalla dimensione di 4"x4" o 2"x4". Blocchi di terra dalla larghezza dalle dimensioni che variano a piacimento, ad eccezione della larghezza che dovrà essere di 10 cm, i blocchi successivamente verranno impilati tra le due guide verticali (Riviera Vidal, A., 2013). Su entrambe le facce dei blocchi viene disposta una griglia di tondini d'acciaio in direzione obliqua prima verso destra e dopo, un secondo corso verso sinistra. Le barre saranno distanziate tra loro di 20 cm.

1.5 Diffusione della terra cruda

in Messico

Secondo i dati raccolti dall'organismo messicano INEGI¹¹ generalmente sul suolo messicano la percentuale di edifici costruiti in adobe varia dal 2 al 9% mentre per la tecnica del *bajareque* i valori rimangono quasi sempre sotto l'1% (T2). Sebbene i dati raccolti¹² sulle pareti in adobe e *bajarenque* siano condivisi e non singoli (infatti per i dati dell'adobe sono compresi anche gli edifici costruiti con legno, mentre per il *bajarenque* gli edifici che utilizzano bambù o palme, ma anche tecniche precarie quali il tappanamento in lamiera metalliche), risultano comunque utili a comprendere quanto bassa sia la percentuale di edifici costruiti con i metodi vernacolari. Nella fattispecie si può notare, sempre grazie ai dati raccolti dall'INEGI, come negli Stati in cui è maggiore l'utilizzo della tecnica di adobe e legno, sia più basso della media il tasso di occupazione¹³ (8); indice che denota una povertà maggio-

¹¹ Instituto Nacional de Estadística y Geografía, è un ente nazionale che raccoglie tutti i dati relativi alla Repubblica federale messicana: abitanti, abitazioni, economia, ecc.

¹² Elaborazione propria dei dati INEGI riferiti agli 'Anuario estadístico y geográfico' per ogni singolo Stato federale messicano.

¹³ Percentuale che rappresenta la popolazione occupata nel settore dei servizi (escluso il commerciale) rispetto alla popolazione occupata.

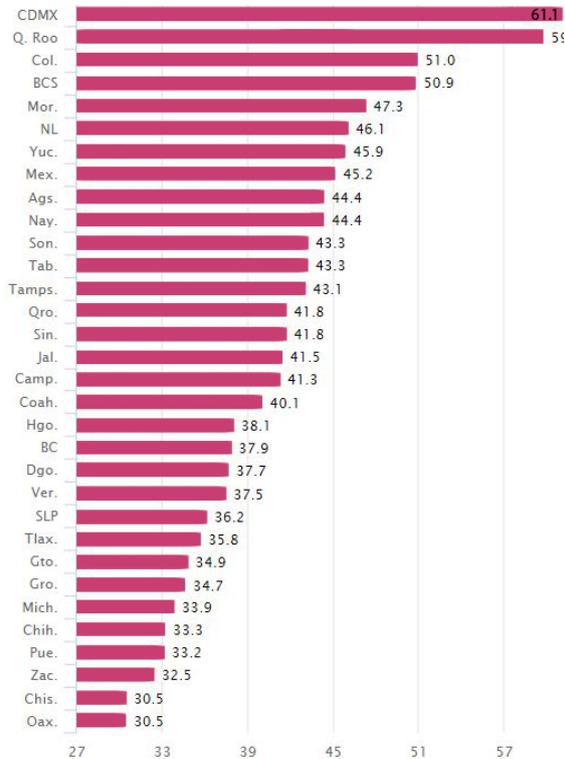
re in questi Stati e quindi una prevalenza per gli abitanti ad utilizzare delle tecniche edilizie più economiche e tradizionali, favorendo appunto i materiali locali. Lo conferma ancora un altro grafico che riporta i valori di arretratezza sociale¹⁴ dei singoli Stati federali (9): dove quasi tutti gli Stati hanno un indice bassissimo, mentre ottengono un punteggio appena sufficiente gli stati di Durango e Chihuahua, diversa è invece la situazione per la Baja California che è quasi in cima alla classifica. Lo dimostra la tabella che indica l'indice di povertà¹⁵ (10), dove si può notare che gli unici Stati ad avere un indice basso (rispetto alla diffusione di edifici in terra sul loro suolo) sono nuovamente la Baja California, Chihuahua e Durango. Per quanto riguarda il clima, invece, la maggior parte degli Stati in questione – Guerrero, Durango, Oaxaca, Chiapas, Zacatecas, Chihuahua, Baja California e Michoacan – presentano alcune caratteristiche comuni: tutti quanti presentano una percentuale di

¹⁴ Valore ponderato che comprende vari indicatori di carenza sociale (educazione, salute, servizi basici, qualità e spazio nelle abitazioni private).

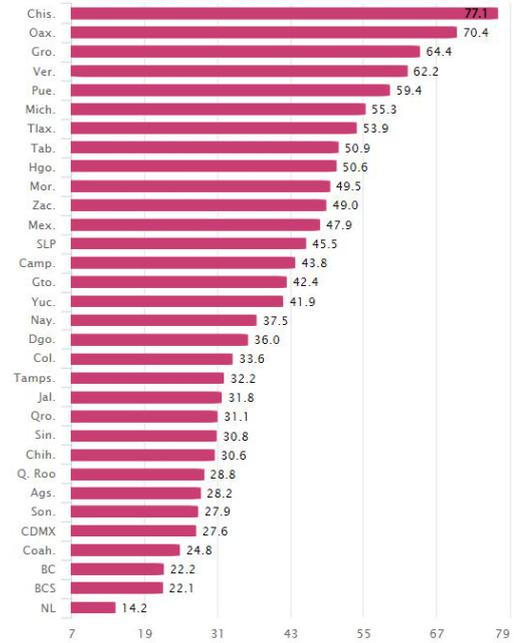
¹⁵ Percentuale della popolazione il cui guadagno mensile è inferiore al valore normale di benessere e i quali risentono di almeno un fattore di carenza sociale.

STATO	POPOLAZIONE	PAVIMENTO in TERRA BATTUTA	PARETI IN ADOBE o LEGNO	PARETI IN BAJAREQUE, LAMINE METALLICHE BAMBU' o PALME
Baja California	961.553	1,23%	19,43%	0,75%
Baja California Sud	208.972	3,84%	8,06%	1,10%
Sonora	812.567	2,59%	7,65%	0,74%
Sinaloa	805.854	2,79%	0,90%	2,89%
Chihuahua	951.205	3,15%	19,50%	0,04%
Cohaulia	809.111	0,73%	12,05%	0,14%
Durango	455.860	3,67%	29,53%	0,12%
Nuevo Leon	1.393.322	0,80%	2,48%	0,22%
Zacatecas	418.756	1,33%	31,91%	0,06%
Tamaulipas	986.886	1,59%	8,20%	0,75%
Nayarit	332.279	3,23%	7,43%	0,48%
Aguascalientes	334.252	0,69%	5,73%	0,10%
San Louis Potosi	709.959	5,49%	12,90%	2,91%
Jalisco	2.058.775	1,43%	5,80%	0,13%
Guanajuato	1.442.381	1,94%	4,35%	0,17%
Queretaro	533.457	1,51%	1,83%	0,19%
Hidalgo	756.798	3,28%	4,83%	1,21%
Colima	204.949	2,30%	2,43%	0,69%
Michoacan	1.191.405	5,52%	15,38%	0,35%
Stato di Messico	3.717.606	30,10%	3,93%	0,05%
CDMX	2.440.641	1,02%	0,25%	0,02%
Tlaxcala	310.416	2,06%	6,33%	0,14%
Morelos	532.231	3,71%	5,28%	0,78%
Puebla	1.553.451	5,49%	8,12%	0,79%
Guerrero	816.642	18,35%	23,20%	2,61%
Veracruz	2.250.001	6,62%	9,64%	4,35%
Oaxaca	936.359	18,74%	15,74%	1,13%
Tabasco	646.059	3,74%	5,96%	4,09%
Chiapas	1.238.565	10,62%	23,07%	3,03%
Campeche	244.299	3,09%	12,92%	2,29%
Yucatan	564.613	1,64%	1,95%	1,78%
Quintana Roo	440.663	2,14%	5,97%	0,95%
MEDIA		4,83%	10,09%	1,10%

T2 ▲ Tabella delle tecnologie costruttive sul suolo Messicano. Elaborazione propria in base a dati INEGI risalenti al 2015, ad eccezione degli Stati di Puebla, Chihuahua e Oaxaca, per i quali i dati risalgono al 2010.

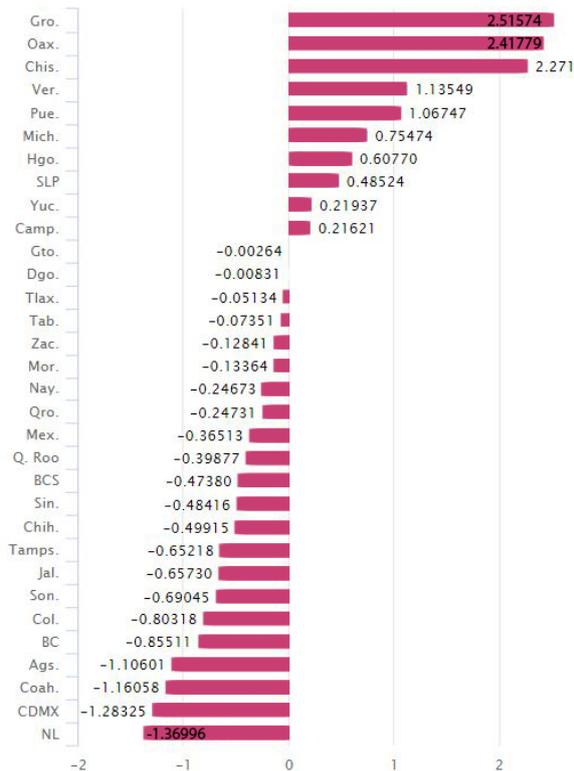


8 ▲ Grafico del tasso di occupazione diviso per entità federativa.



10 ▲ Grafico dell'indice di povertà diviso per entità federativa.

9 ▼ Grafico dell'arretratezza sociale diviso per entità federativa.



clima semi-umido, eccezion fatta per Zaca-
tecas e Baja California che presentano un
clima più secco rispetto agli altri. Inoltre per
tutti quanti variano di molto le temperature
medie e le precipitazioni annue, passando
dai 50 mm della Baja California ai 1.200-
4.000 di Chiapas (T3).

STATO	Tm	TMax-Tmin	CLIMA SEMI-U-MIDO	CLIMA SECCO	CLIMA TEMPE-RATO	CLIMA CALDO	CLIMA MOLTO SECCO
GUERRERO	25 °C	32-18 °C	82,0%	9,0%	5,0%	3,0%	/
OAXACA	22 °C	31-12,5 °C	47,0%	11,0%	16,0%	22,0%	/
CHIAPAS	18 °C	30-17,5 °C	40,0%	/	3,0%	54,0%	/
ZACATECAS	17 °C	30-3 °C	17,0%	73,0%	/	/	6,0%
DURANGO	17 °C	31-1,7 °C	34,0%	40,0%	1,0%	11,0%	14,0%
CHIHUAHUA	17 °C	30-0 °C	24,0%	33,0%	/	/	40,0%
BAJA CALI-FORNIA	18-19 °C	30-5 °C	7,0%	24,0%	/	/	69,0%
MICHOACAN	20 °C	30-8 °C	54,4%	15,0%	29,0%	/	/

T3 ▲ Tabella del clima presente nei vari Stati presi in Analisi. Elaborazione propria in base a dati INEGI.

Nel complesso de la *Joya a Veracruz* (11) sono presenti 130 siti archeologici di costruzioni in terra cruda in un'area di 1200 km². La terra cruda di solito in antichità veniva utilizzata in posti poco piovosi, o con materiali che la proteggessero dalle intemperie. Infatti il sito di Veracruz è soggetto a circa 1500 mm di pioggia annua, uragani nelle stagioni estive e venti forti invernali, i quali trasportano la salsedine marina che intacca gli edifici. Dal documento in questione (Daneels, A., Guerrero, L., 2013) si evince che il sito ha subito due tappe di costruzione: la prima risalente tra il 380 e il 580 d.C., mentre la seconda è compresa tra il 400 e il 570 d.C. in seguito ci fu un imponente incendio che ha permesso di conservare le architetture e poterle studiare approfonditamente. Si è così scoperto che il basamento in terra, è formato da strati alterni di blocchi argillosi e sabbiosi i quali permettono di controllare l'umidità entrante nell'edificio. Inoltre la malta di finitura basamentale era composta da uno spesso strato di argilla, limo e frammenti ceramici che permettevano un ottimo dilavamento delle acque meteoritiche. Le pareti invece, sono costituite da blocchi di



11 ▲ Basamento in terra della Joya, la parte più scura in terra sabbiosa, mentre quella più chiara in terra argillosa. Foto di Louis Guerrero.

terra cruda con una terra ad alto contenuto argilloso e dell'erba tagliata finemente. Dalla disposizione dei mattoni si evince una sapiente tecnica strutturale che ha garantito agli edifici di non subire danni a causa dei sismi durante i secoli a venire. Per quanto riguarda la copertura invece si è scoperto essere piana e non inclinata come era solito farla all'epoca; essa era composta da rami intrecciati dal diametro di un centimetro (similmente a come vengono intrecciati nella tecnica del *bajareque*) e poi ricoperto superiormente da una miscela di terra con una maggior componente organica. Il vero punto forte del complesso della *Joya* risulta però essere il rivestimento utilizzato per le parti esterne, il quale era spesso tra l'1,3 e i 2 cm e applicato su tutta la struttura con soluzione di continuità. Il composto era formato da terra e da erba finissima, addirittura setacciata, e con al suo interno una sostanza organica che fungeva da legante durante la fase di posa. Ancora oggi non si è riusciti a scoprire che tipo di sostanza fosse, nonostante tutti i test effettuati. Un indicatore della bontà della malta realizzata dalla popolazione indigena è il fatto che quest'ul-

tima sia stata sostituita solamente 4 volte durante tutta la vita degli edifici, che risulta essere quasi di due secoli.

Un altro sito archeologico di nota importanza è quello situato nella *Biosfera Sierra* in Baja California Sur (**12,13**). Quelle con cui si è scontrati sono delle abitazioni indigene le quali sono in un'area che comprende distanze generose con altezze variabili. La maggior parte di questi edifici come ci mostra la tabella (**T4**) sono fatti in legno intrecciato (come il *bajareque* ma senza l'apposizione dello strato di terra), un'altra parte in *bajareque* classico, mentre solamente una abitazione è costruita con travi di legno. L'autore dell'analisi (*Centro de Investigación Hábitat y Energía, Instituto de Arte Americano, 2007*) crede che l'utilizzo della terra per le costruzioni in questa biosfera sia giustificata dal fatto che l'impasto era atto a proteggere il legname poiché le piogge erano molto frequenti in quella fascia altimetrica; mentre invece sulle alture più elevate, nonostante la temperatura più fredda alle abitazioni non veniva apposta alcuna malta. Questa riserva naturale è una



12 ▲ Muri di bajareque con terra presenti nella Biosfera Sierra. *Centro de Investigación Hábitat y Energía, Instituto de Arte Americano, Construcción con tierra, Ciudad de Buenos Aires, 2007, p. 46.*



13 ▲ Muri di bajareque senza terra presenti nella Biosfera Sierra. *Centro de Investigación Hábitat y Energía, Instituto de Arte Americano, Construcción con tierra, Ciudad de Buenos Aires, 2007, p. 46.*

T4 ▼ Tabella delle tecnologie costruttive nella riserva di Biosfera Sierra. *Centro de Investigación Hábitat y Energía, Instituto de Arte Americano, Construcción con tierra, Ciudad de Buenos Aires, 2007, p. 45.*

LOCALITA'	ALTEZZA m slm	CASE IN BAJARE- QUE senza terra	CASE IN BAJARE- QUE	CASE IN LEGNO
El Chorro	200		1	
Texcalama	310	1		
San Andrés	345		3	
Ancon Largo	361		1	
El Chinal	362	2		
Santo Domingo	380	2	1	1
Los Peredones	700	1		
La Matancita	786	1		
San Antonio	800	1		

delle poche in cui si può apprezzare come fossero costruite in maniera vernacolare questo tipo di abitazioni in quella zona e pertanto è un sito che deve essere protetto e controllato costantemente.

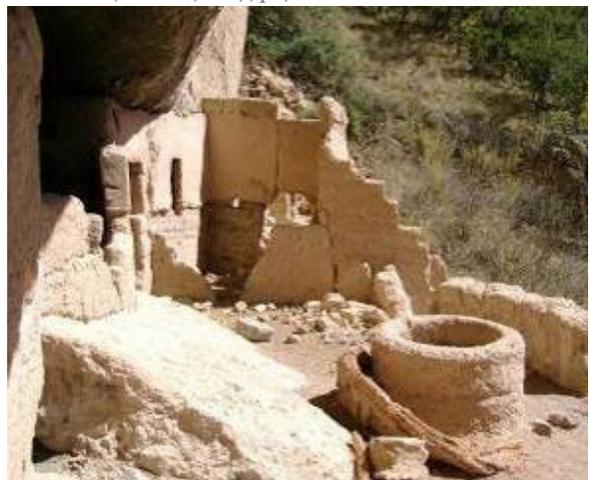
Anche nel *XIX Congresso nazionale di Ingegneria Strutturale* (Guerrero Baca, L.F., 2017), risalente al 2017, viene riportato alla luce l'utilizzo della tecnica del *bajareque* negli Stati di Veracruz, Jalisco nonché al centro del Paese e persino nelle regioni del Sud-Est come Oaxaca, anche con varianti che possono implementare tavole di legno o bambù in modo tale da aumentare la risposta sismica dell'edificio. Nello Stato di Durango, in un sito chiamato *Cueva de Maguey* (15) i tetti venivano legati con delle corde alla struttura lignea del muro, e successivamente ricoperti di terra in modo tale da dare una maggior resistenza alla struttura in caso di terremoto. Più a Nord nello Stato di Chihuahua si trova un altro sito che, propone degli edifici a pianta circolare, la quale risulta essere la meno deformabile durante gli eventi sismici (Keable, J., 1996). La *Cueva de Sirupa*, così si chiama

il sito, (16) e gli edifici nelle vicinanze venivano costruiti con la classica miscela di terra con aggiunta di sostanze organiche. Le abitazioni venivano così create con una sottostruttura di intrecciato ligneo, la quale veniva coperta con delle sfere di terra cruda; successivamente esse venivano compattate adeguatamente per garantire una maggior stabilità.



15 ▲ Muri di bajareque nella Cueva de Maguey, foto di Lois Guerrero. *Luis Fernando Guerrero Baca, Pasado y porvenir de la construcción con bajareque, Departamento de Síntesis Creativa, Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, México, 2017, p. 6.*

16 ▼ Sito della Cueva de Sirupa a Chihuahua, foto di Louis Guerrero. *Luis Fernando Guerrero Baca, Pasado y porvenir de la construcción con bajareque, Departamento de Síntesis Creativa, Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, México, 2017, p. 7.*



2

*costruzione di una vivanda
in Messico*

2.1 TKli

2.2 *Vivienda*

2.3 Workshop

2.3.1 Strumentazione utilizzata

2.3.2 Demolizioni

2.3.3 Consolidamento

2.3.4 Costruzione

2.3.5 Creazione degli adobe

2.3.6 Considerazioni sulla
vivienda

2.4 10 cause di cedimento

2.5 Elementi sismoresistenti

2.5.1 Fondazioni

2.5.2 Maglia strutturale

2.5.3 Aperture

2.5.4 Copertura

2.5.5 Catena superiore

2.6 Memoria fotografica

2.1 TKli

Sul territorio messicano esistono tantissime associazioni, le quali intervengono nel post-sisma e si occupano dei compiti più svariati: come per esempio raccogliere abiti o cibo e distribuirli nelle piccole comunità o agli sfollati. Altre che invece, si dedicano della costruzione di case distrutte dai terremoti. La ricostruzione delle abitazioni può avvenire con l'utilizzo di tecniche moderne come il cemento, il legno, i mattoni cotti; oppure in alcuni casi, per abbattere i costi sulla materia prima, con tecniche tradizionali come può essere la terra cruda.

Tra le varie organizzazioni presenti in Messico quella con cui ho avuto l'occasione di collaborare è stata la TKli. Questa si occupa della ricostruzione seguendo le regole vernacolari delle case, con la tecnologia della terra cruda; è quindi un'associazione atta a preservare la cultura del paese e le tradizioni, molto di più rispetto alle altre elencate. Inoltre, uno degli obiettivi prefissati dalla suddetta associazione era quello di poter realizzare una abitazione degna per i conchilini, la quale rispettasse altresì le più basiche norme di sicurezza, comprese

quelle antisismiche, vista la calamità accaduta alcuni mesi prima.

C'è da dire però che questa associazione aiutava solo pochissime famiglie: in primis per mancanza di fondi - i quali provenivano solamente da privati e non dallo Stato -, e perchè le famiglie da aiutare dovevano avere delle caratteristiche ben precise per vincere il bando indetto dalla TKli:

- La prerogativa principale di questa associazione era che l'abitazione che si sarebbe ricostruita doveva rispecchiare le tecnologie culturalmente più forti, ovvero quelle vernacolari. Anche se come abbiamo visto prima le case in terra cruda nel Paese messicano rappresentano una quota ormai irrisoria, sono parte della cultura locale di molte comunità che ancora oggi le abitano e le costruiscono. Le case scelte per la ricostruzione erano in terra cruda, e più nello specifico in adobe.
- Durante le fasi di sopralluogo veniva analizzata la struttura dell'intera casa visionando tutti i fattori rile-

vanti per la ricostruzione: le parti lesionate che si potevano restaurare, quelle da demolire e se erano presenti le parti costruite con altri materiali diversi dalla terra cruda (legno, cemento, acciaio, ecc.). Dopo la fase di analisi, l'obiettivo principale dell'organizzazione era quello di: recuperare il più possibile il materiale in disuso, quindi sbriciolare e riutilizzare gli adobe caduti o resi inutilizzabili a causa del sisma; restaurare le parti dell'edificio che asservivano ancora ad una funzione portante o che non erano state intaccate particolarmente dal sisma; preservare tutte quelle parti dell'edificio che non avevano subito alcun danno e che quindi sarebbe stato inutile demolire.

- Le famiglie che venivano aiutate da questa associazione dovevano appartenere ad una determinata fascia economica, e quindi dimostrare che non sarebbero riusciti a autofinanziare la ricostruzione della propria casa.

- La famiglia poteva, se ne era in grado, aiutare durante la ricostruzione dell'abitazione. Lo scopo era di essere in grado di apprendere una tecnologia sempre più in disuso e sapere come poter manutentare la suddetta architettura in futuro.
- Le famiglie scelte per il finanziamento dovevano essere in grado di apportare una microeconomia nella comunità locale: questo significa che la casa doveva appartenere ad un artigiano oppure che parte della casa era adibita ad un negozio di alimentari, il quale indirettamente, generava economia all'interno della comunità.

L'architetto Fabiola Pozadas Torres, la quale faceva parte dell'organizzazione di questa ONG, ha scelto la casa che doveva essere ricostruita per merito di TKli e ha organizzato tutta la parte progettuale di ristrutturazione, la parte logistica relativa all'arrivo delle materie prime: i mattoni cotti per la realizzazione della catena supe-

riore e il legname per la costruzione del tetto; nonché stilato il cronoprogramma per la ricostruzione dell'abitazione.

Io, con ad altri studenti della UNAM e dell'UPR¹⁶, assieme alla supervisione di due professori **Alvaro Lara** e **Elio S. Martinez Joffré** (i quali avevano già organizzato Workshop sulla costruzione di edifici in terra cruda) abbiamo offerto un contributo di tipo manovalanza, andando ad apprendere le basi sulla costruzione di un edificio in terra cruda: partendo dalla creazione dell'impasto atto a modellare i blocchi d'adobe, fino alla costruzione dei muri esterni e delle aperture con alcune accortezze tecnologiche per quanto riguarda il lato antisismico dell'edificio. L'edificio da noi ricostruito, come si può notare dalla mappa della divisione in zone **(3)** ricade tra la zona C e la D, vicino alla *Brecha de Guerrero*. Ne consegue che il periodo di ritorno sismico è maggiore e gli eventi più disastrosi.

Il Workshop in questione si è quindi tenuto

¹⁶ *Universidad de Rio Piedras*, è un università di Porto Rico.

a Ixcamilpa de Guerrero, nella comunità El Organal, la quale si trovava a confine tra lo Stato Federale di Puebla e Guerrero **(17)**. Questa piccola cittadina è sita nella parte più a Sud-Ovest dello Stato di Puebla e a soli 73 km di distanza dall'epicentro del terremoto avvenuto il 19 Settembre del 2017 **(1)**. La comunità è piuttosto piccola ed ospita circa 140 persone le quali si occupano prevalentemente di attività agricole, basate su coltivazioni di mais, fagioli, zucca, arachidi, sorgo e fiori di ibisco.

Nella suddetta comunità sono presenti 74 abitazioni: la totalità di esse ha accesso a servizi di scarico fognario e di elettricità; quasi il 90% ha un attacco all'acqua corrente e di questa percentuale l'80% possiede un frigo dove conservare i cibi e il 77% una lavatrice per lavare i propri panni sporchi. Mentre le fonti elettriche vengono sfruttate in questa maniera: un 36% possiede una radio, un 86% un televisore, ma solamente il 2% possiede un computer. Infine, in generale, il 23% possiede un mezzo di trasporto proprio e solamente un 3% è in possesso di uno smartphone **(18)**.



17 ▲ Area della comunità dove ha operato l'associazione.



La famiglia del signor Leoncio, che è riuscita ad aggiudicarsi il bando di concorso con l'associazione TKli possedeva una piccola casa in adobe. Viveva ad El Organal ed era composta da lui, sua moglie e il piccolo figlio che aveva 9 anni. Il terremoto del 19 Settembre causò parecchi danni alla loro casa e si ritrovarono in una situazione in cui o ricostruivano la casa, smettendo di dedicarsi alla loro attività familiare, o continuavano a lavorare con una parte della loro casa ormai crollata. La famiglia infatti viveva, al momento del nostro arrivo, nel magazzino della loro piccola attività lavorativa.

La famiglia gestiva una panetteria che produceva pane dolce e salato per l'intera comunità. Questa era la loro unica fonte di guadagno. L'abitazione con caratteristiche architettoniche vernacolari e il profilo socio-economico della famiglia rispondevano entrambi alle condizioni stabilite dall'associazione per la presa in carico della ricostruzione. Il progetto comprendeva quindi la ristrutturazione di una parte dell'edificio con conseguente ricostruzioni di parti crol-

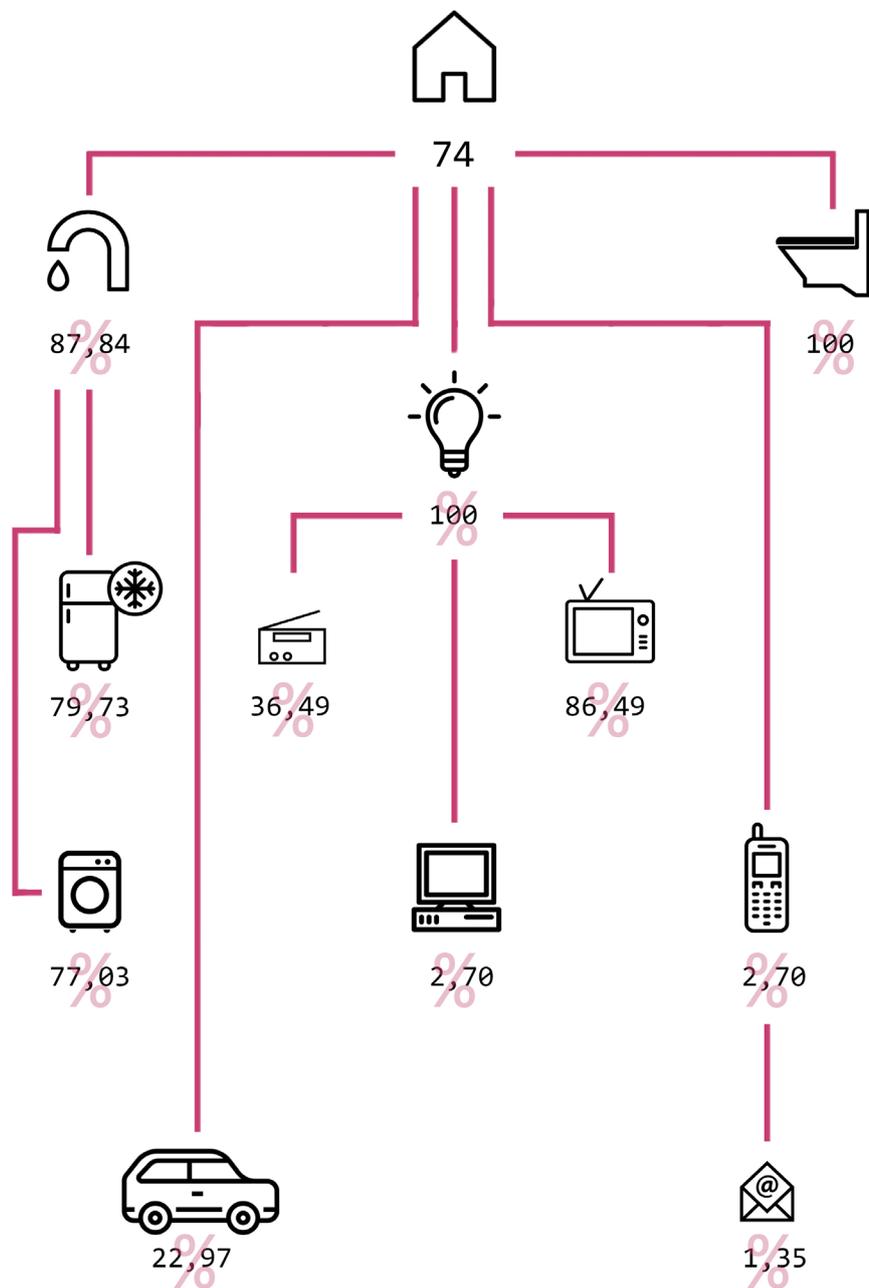
late e altresì l'espansione di due locali per ottenere una maggiore superficie calpestabile e maggior spazio per la famiglia (19). Il bando prevedeva inoltre la costruzione di un forno in mattoni cotti, oltre a quello già presente di produzione della famiglia stessa, per poter permettere di generare un maggior quantitativo di prodotti commestibili durante la giornata.

Gli attori che hanno partecipato alla costruzione di questo edificio sono i seguenti:

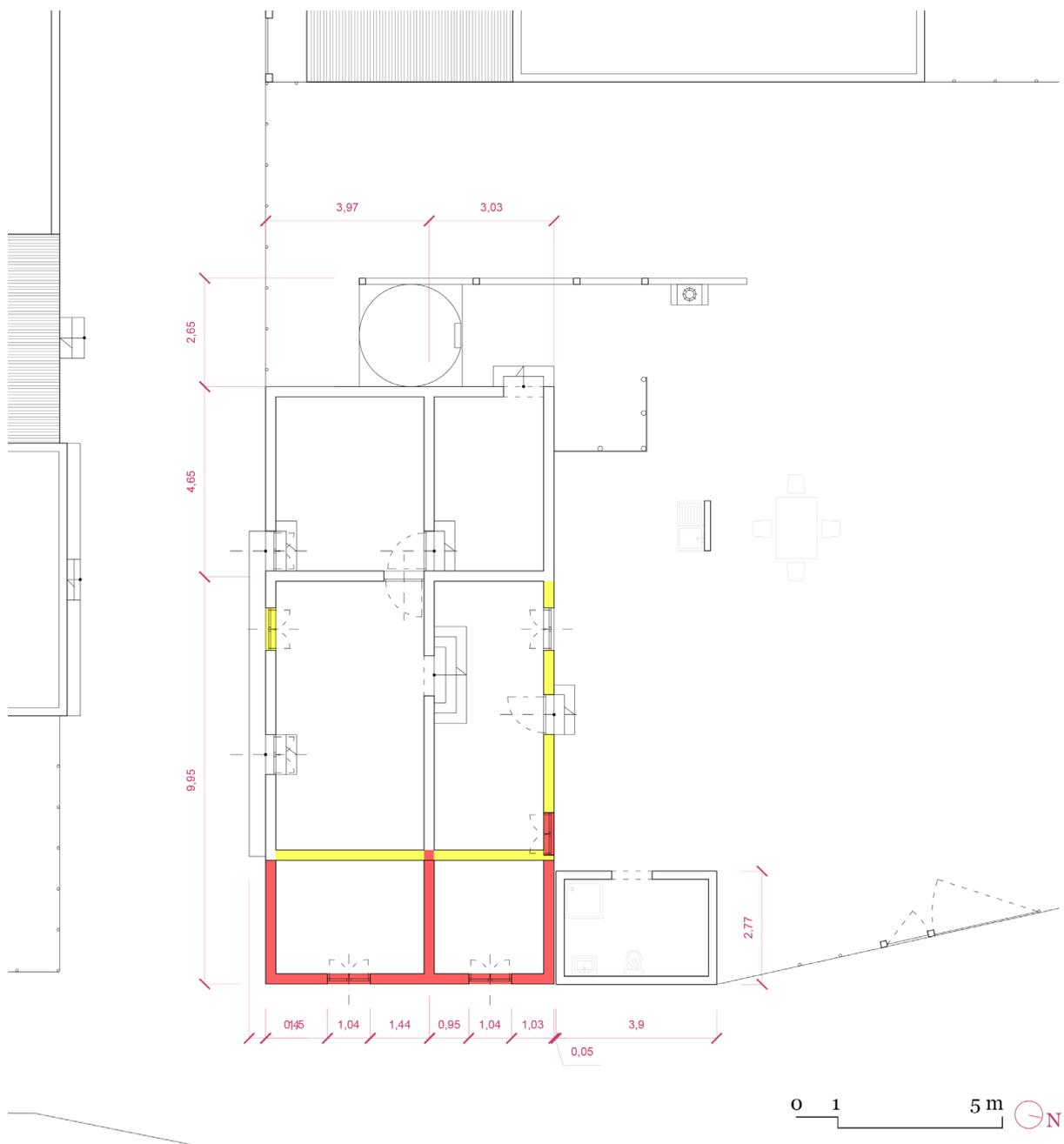
- L'architetto Fabiola Pozadas Torres, che ha organizzato assieme a TKli il workshop e che ha realizzato il progetto per la ricostruzione della vivienda distrutta dal sisma.
- I professori Alvaro Lara e Elio S. Martinez Joffré, che con la loro esperienza in costruzione vernacolare in terra cruda hanno potuto guidarci durante tutte le fasi del workshop (dalla creazione fino alla posa dell'ultimo mattone di adobe) dispensando consigli e dirigendo i lavori tra i vari team che hanno costruito la casa.

- Gli studenti dell'università di Città del Messico e di quella di Porto Rico che assieme a me hanno avuto il piacere di partecipare a questa iniziativa per poter apprendere come si costruisce in maniera vernacolare una casa in terra cruda.
- La famiglia di Leoncio che oltre a darci un grandissimo aiuto nella fase di costruzione della casa, occupandosi della reperibilità della materia prima necessaria per i vari impasti e del trasporto dei blocchi di adobe per la costruzione delle mura, ci ha accolto a braccia aperte, donandoci cibo e riparo durante tutti i 10 giorni del workshop, con la solita cordialità messicana a cui siamo sempre stati abituati.

E' stato così possibile, dopo aver stabilito tutte le mansioni dei vari partecipanti al Workshop, iniziare la ricostruzione della Vivienda.



18 ▲ Schema della comunità El Organal.



19 ▲ Pianta della casa con sovrapposizione nuove opere e demolizioni.

2.2 *Vivienda*

La *vivienda* è la casa vernacolare messicana. Questa appartiene più propriamente ad una realtà povera, relegata alle zone rurali della nazione centroamericana. La casa tradizionale ha subito moltissimi cambiamenti durante i secoli. In passato, i materiali utilizzati erano quelli presenti in natura ovvero la terra, la paglia e il legno, i quali venivano occupati per la costruzione sia dei muri di tamponamento che per il tetto. Successivamente, dopo la colonizzazione spagnola, nei centri abitati venne introdotta la tecnica di costruzione con blocchi di laterizio cotto (*Daneels, A., Guerrero, L., 2013*); oggi invece, c'è un utilizzo preponderante di calcestruzzo e blocchi di cemento; questo cambiamento è dovuto sia all'influenza degli Stati Uniti sui Paesi del Centro e Sud America, sia ad una maggior economicità del materiale e ad una risposta sismica relativamente buona.

L'utilizzo di blocchi prefabbricati e di calcestruzzo armato è una scelta sicuramente al passo con i tempi contemporanei, ma porta con sé delle mancanze sostanziali. Prima fra tutte è la mancanza di tradizionalità

poiché questo tipo di tecnologia non appartiene alla cultura popolare messicana, infatti come detto prima le popolazioni locali, costruivano e ancora tutt'oggi costruiscono in terra cruda, seppur in quantità sensibilmente minore¹⁷. In secondo luogo non esiste una vera maestria nell'utilizzo di questi materiali: il cemento armato e il calcestruzzo sono materiali giovani, scoperti a cavallo tra il 1800 e il 1900, quindi per quanto si conoscano le dinamiche e il metodo di costruzione di questa tecnologia, la popolazione locale sarà sempre più esperta nella costruzione di case in terra cruda o in mattone cotto (con il quale si hanno millenni di esperienza edilizia). Infine, le materie prime a base cementizia non sono adeguate per il clima tropicale del Messico; questo è già stato dimostrato precedentemente con l'analisi effettuata da **Fathy** (*Centro de Investigación Hábitat y Energía, Instituto de Arte Americano, 2007*); infatti le abitazioni in terra cruda hanno un maggior time lag, e quindi trattengono maggiormente il calore, rilasciandolo durante le ore notturne

¹⁷ Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010) 'Principales resultados del Censo de Población y Vivienda 2010, México'.

quando, tendenzialmente, la temperatura si abbassa. Purtroppo, come dimostrano le analisi di INEGI¹⁷; le case costruite in terra cruda sono sempre meno, e quindi in maniera tradizionale, ma qualche persona ancora oggi per un fattore di economicità e tradizionalità è disposto a costruirle con questa tecnologia.

Catalogare una *vivienda* per il suo utilizzo di materiale edile è riduttivo: per la cultura messicana è prima di tutto l'espressione della sicurezza familiare, l'orgoglio di avere un "pezzo di terra" che è di propria appartenenza e che sosterrà le esigenze della famiglia per gli anni a venire. A questo fattore si aggiunge un altro elemento importante: ovvero che la *vivienda* è spesso anche il luogo che ospita la propria attività lavorativa a conduzione familiare, quale può essere la panetteria della famiglia scelta da TKli, o un normalissimo alimentari, piuttosto che una bottega dell'artigiano; la casa diventa così un luogo che ha anche un valore economico maggiore e che può garantire la stabilità familiare. Inoltre, quasi sempre è dotata di un giardino, nel quale ci

si può dedicare alla coltivazione o all'allevamento e dove i bambini possono giocare; la parte esterna della casa, ovvero il giardino svolge quindi un ruolo fondamentale per la famiglia: poiché funge da fonte di sostentamento alimentare per i membri che ci vivono. La *vivienda* è quindi un *unicum*, che si vive a tutto tondo.

Generalmente è formata da non più di due o tre ambienti: un ambiente dove si cucina, si mangia e spesso si dorme ed uno spazio dedicato al lavoro. Solitamente l'ambiente commerciale dà verso il fronte stradale e coincide con l'entrata della casa; da questo si può poi accedere agli ambienti comuni che come detto possono essere rappresentati da una stanza dove si svolgono tutte le funzioni familiari o da due se il nucleo familiare ha una quantità di componenti maggiore. Inoltre, nel giardino solitamente sono presenti i servizi igienici i quali spesso sono staccati dal fabbricato principale. La casa tradizionale messicana è quindi un edificio dalle dimensioni contenute, che però è in continuo mutamento; questo è dovuto principalmente all'attitudine che

la popolazione messicana ha nei confronti dell'autocostruzione¹⁸. Quando i membri nel nucleo familiare aumentano o insorgono determinate esigenze collettive ci si adopera per espandere gli spazi casalinghi: aggiungendo per esempio camere in più per i propri figli, o per gli anziani i quali vengono accolti nell'abitazione dei figli, oppure creando nuovi spazi di convivialità familiare.

¹⁸ Flores Rodríguez, L. (2009) *La Vivienda en México y la población en condiciones de pobreza*.

2.3 Workshop

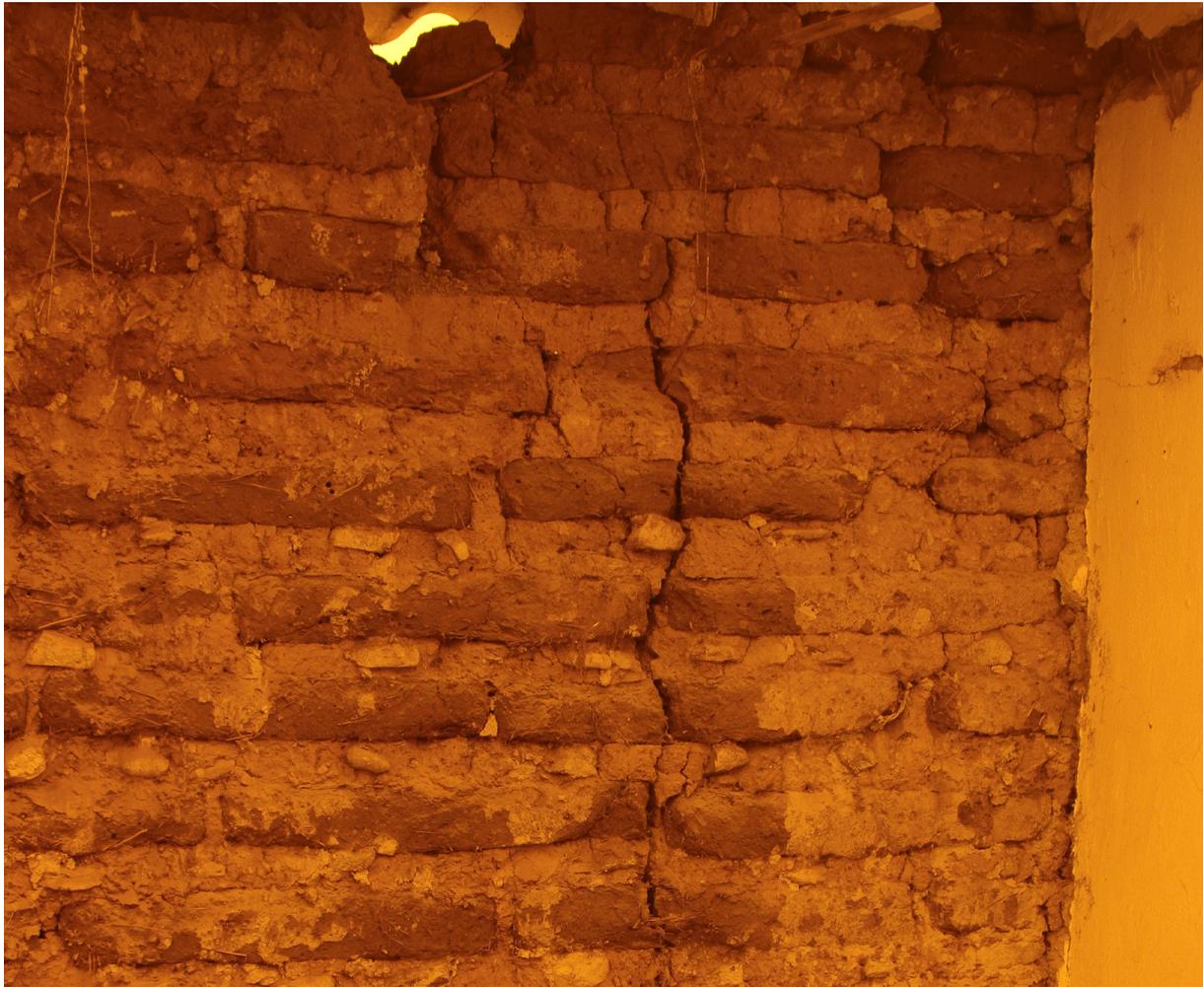
Con il primo sopralluogo dell'abitazione, oggetto del workshop, sono stati riscontrati lesioni da entrambi i lati delle partizioni verticali, e parziali crolli della copertura; la quale era stata coperta, nelle parti mancanti, da un telo di nylon, limitando il ricircolo dell'aria e alzando notevolmente la temperatura interna (20,21).

Il progetto dell'architetto Fabiola Pozadas Torres prevedeva due fasi: una di demolizione delle pareti e del tetto, e, successivamente, la loro ricostruzione con ampliamenti della zona privata dell'abitazione.

Le fondazioni erano già state ricostruite, in un primo momento, in pietra e mattoni.



20 ▲ Le condizioni in cui verteva l'abitazione appena arrivammo sul sito.



21 ▲ Le lesioni causate dal sisma.

2.3.1 Strumentazione utilizzata

Gli utensili utilizzati durante tutte le fasi sono principalmente gli stessi:

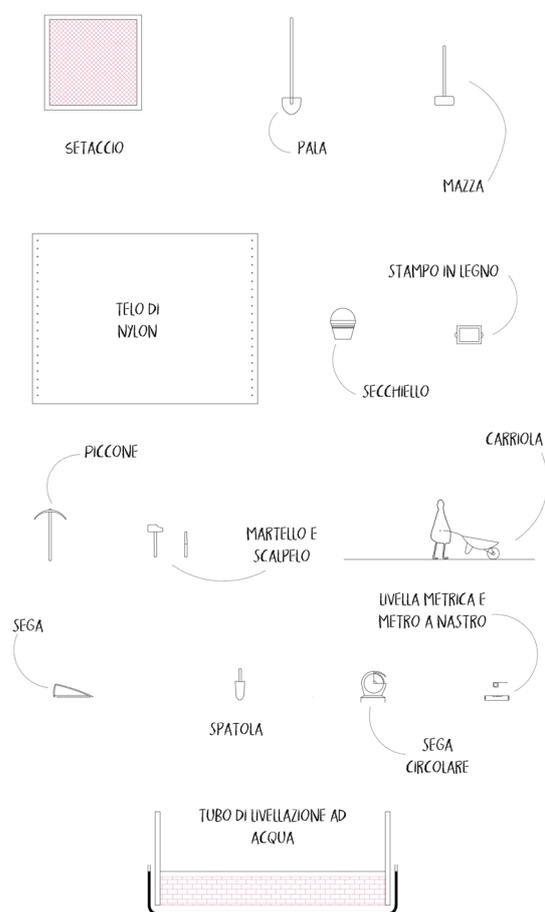
- Nella fase di demolizione sono state usate piccone, scalpello e martello rispettivamente per agire in aree più specifiche, mentre la mazza è stata utilizzata per una demolizione più blanda, destinata a quelle parti che dovevano essere fatte crollare interamente. La sega è stata occupata per tagliare le travi del tetto vecchio che sono state rimosse per poter riuscire ad agire meglio nel restauro dei muri sottostanti. Per l'asportazione dei detriti sono stati caricati sulla carriola e spostati nell'area adibita al successivo smaltimento. Inoltre sono state impiegate scope per tenere in costante pulizia l'ambiente di lavoro.

- Le fasi di costruzione e consolidamento, hanno richiesto più strumentazione. Per mantenere l'orizzontalità delle pareti è stato necessario utilizzare dei paletti di legno con alle estremità legato un filo. Questo è stato posizionato mediante un tubo di gomma, riempito d'acqua; si controllava dopo diversi corsi di adobe se si stesse seguendo l'altezza dell'acqua presente nella gomma. Se il corso

di adobe pendeva da un lato si controbilanciava spostando il filo leggermente più in alto su un paletto, e nella posa del blocco di terra si aggiungeva più malta. Per trasportare la malta di allettamento necessaria per la posa degli adobe si è ricorso ad alcune carriole e successivamente è stata posizionata con delle cazzuole o a mano. Con la cazzuola inoltre era anche possibile spaccare della dimensione desiderata i blocchi di terra grazie all'ausilio del metro. Le livelle invece servivano per controllare sempre la buona messa in opera del blocco di adobe e la sua orizzontalità, nonché l'eventuale spiombamento. La cazzuola veniva anche utilizzata per rifinire le giunture orizzontali e verticali della malta. La sega circolare è stata usata per tagliare le travi di legno che sarebbero servite da architravi per le aperture. Anche in questa fase: scope e carriole sono servite per mantenere pulito l'ambiente dalle macerie o residui di materiale.

- Nella fase di creazione degli adobe si sono utilizzati un setaccio e una pala per poter sgranare la terra grezza, frantumata precedentemente, dagli adobe ormai in disuso a

causa del terremoto. Un pestello è servito per frantumare finemente lo sterco animale; una carriola per preparare l'impasto ed avere il giusto dosaggio delle singole componenti, un secchio per aggiungere l'acqua al prodotto finale, dei teli di plastica su cui mescolare tutti gli ingredienti per l'adobe. Infine i casseri lignei che hanno dato la forma finale all'adobe.



▲ Strumenti utilizzati durante la costruzione della vivienda.

2.3.2 Demolizioni

La fase di demolizione è iniziata con lo smantellamento delle travi principali e secondarie della copertura **(22,23)**, seguito dall'intervento mirato con martello e scalpello **(24,25)**, delle pareti **1, 3, 4 e 5 (26)** che risultavano tuttavia utilizzabili; è seguito l'abbattimento totale, tramite semplici mazze, delle partizioni **6 e 7** al fine di una successiva ampliamento.

Le macerie, in particolare i blocchi di terra cruda, sono state riusate nella ricostruzione dell'abitazione: infatti, nonostante la struttura delle partizioni si è stata considerata inagibile, le caratteristiche proprie degli adobe si sono mantenute.



22 ▲ Smantellamento del tetto.

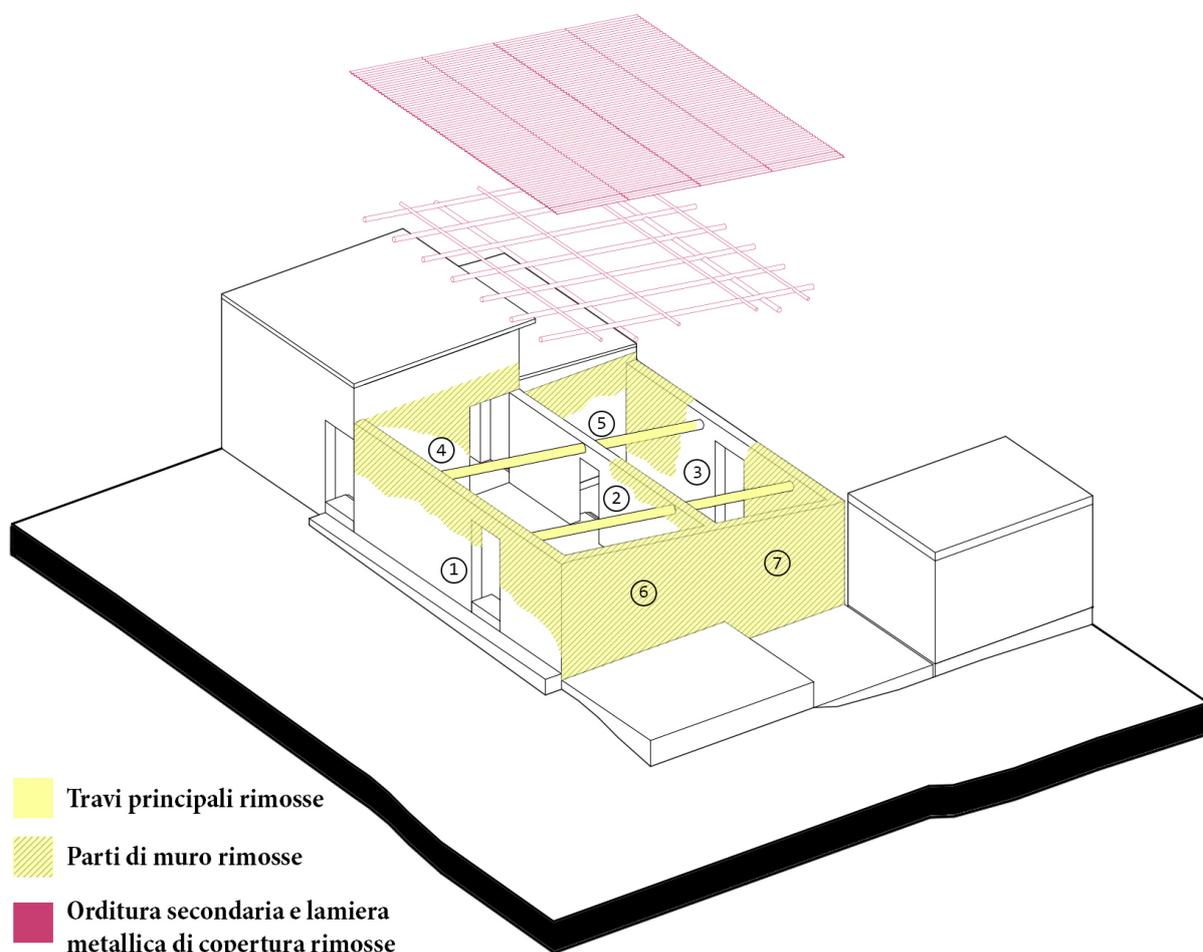
24 ▼ Fase di demolizione controllata di alcune parti dell'abitazione.



23 ▲ Taglio della trave primaria della struttura del tetto.

25 ▼ Fase di demolizione di un'intera parete dell'abitazione.





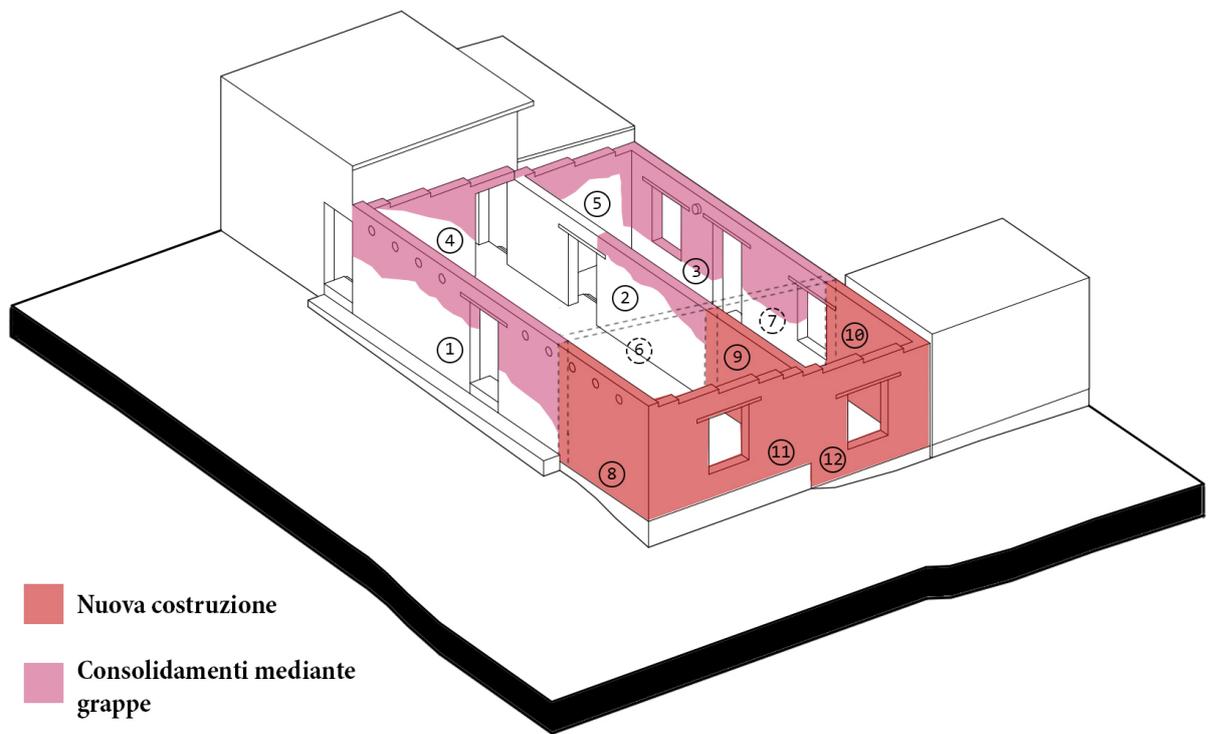
26 ▲ Modello che analizza la fase relativa alla demolizione dell'edificio.

2.3.3 Consolidamento

Si è deciso di mantenere tutte le parti considerate agibile e di restaurarle, seguendo la filosofia della costruzione sostenibile, sostenuta dall'associazione TKli.

La consolidazione delle partizioni **1, 3, 4, 5 (27)** è avvenuta utilizzando tondini di acciaio che funzionavano da “grappe” tra la vecchia parte di muro e quella nuova: si è perforata la malta esistente ed inserito il tondino di acciaio **(28)**, dopodiché affogato la medesima barra nel nuovo corso di mattoni **(29)**.

Tutte le aperture presenti sono state mantenute; nella parete esterna numero **3** si è aggiunta una finestra (130cmX100cm).



27 ▲ Modello degli ampliamenti e consolidamenti strutturali.



28 ▲ Perforazione della malta esistente per l'inserimento del tondino.



29 ▲ Inserimento della grappa nel foro.

2.3.4 Costruzione

L'ampliamento del progetto prevedeva "l'allungamento" parallelo dei due ambienti privati, in modo tale che la zona notte confinasse con il blocco dei servizi igienici, seppur non creando un passaggio tra i due fabbricati (30). Sulla parete corta, a Est, sono state poi inserite due aperture (130cmX100cm) al fine di ricevere internamente una quantità maggiore di luce naturale. Al contrario, a Sud, per limitare la radiazione solare, si è preferito mantenere la porta d'ingresso e inserire, negli ultimi tre corsi di mattoni, dei tubi in PVC di 25 cm di diametro, per il ricircolo naturale dell'aria (31).

Il workshop, della durata di 10 giorni, ha permesso la realizzazione di tutte le pareti dell'edificio, dando forma all'inclinazione del tetto, senza però terminare la copertura.

Una volta creata la "seghettatura" per l'inclinazione delle pareti perimetrali, è consigliato posizionare ulteriormente almeno due corsi di mattoni cotti che fungano da catena superiore. Al di sopra della catena si dovrà poi appoggiare la travatura principa-

le lignea del tetto.

La tecnica per la realizzazione del tetto è tipica della tradizione locale, il *tenotchle*, arbusto simile alla canna di bambù, ridotto in canne viene legato assieme. Successivamente le canne vengono posizionate perpendicolarmente e congiunte alla travatura principale, ricoperte da uno strato di terra cruda in primo luogo e successivamente da tegole in terra cotta (32,33).

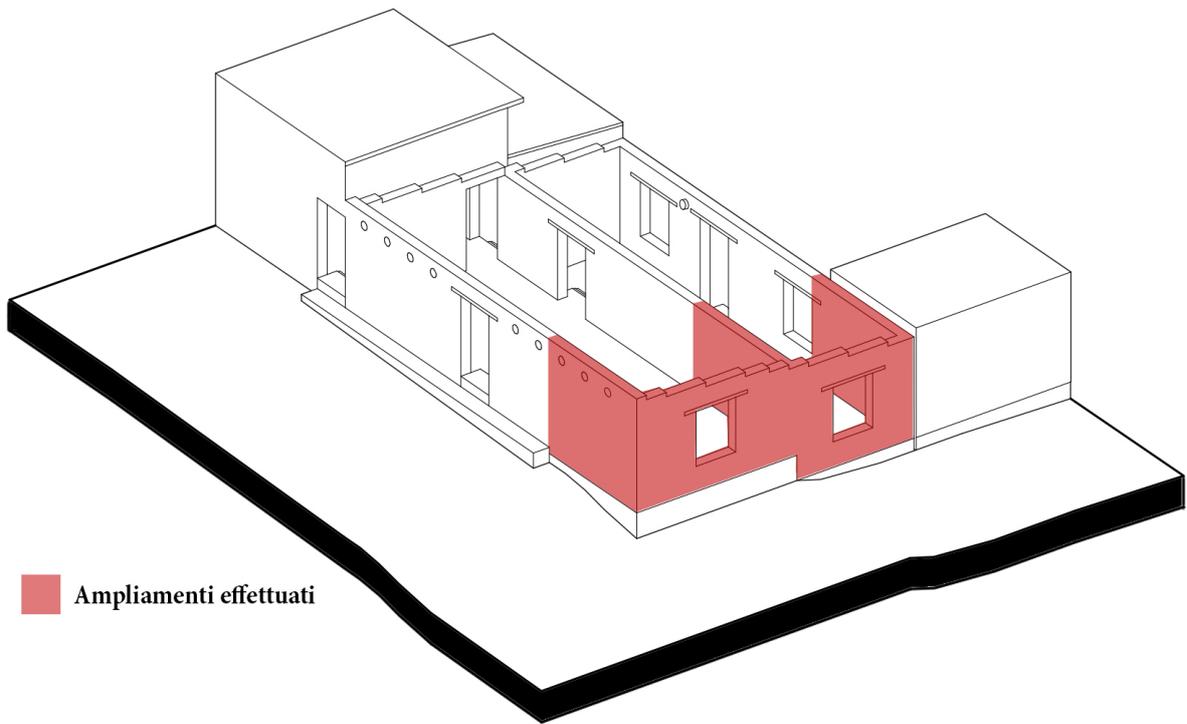
La fitta maglia che si crea con l'intreccio delle canne crea un piacevole effetto visivo interno, aggiungendo valore alla tecnica prescelta (34).

Durante i giorni del workshop il team era suddiviso in gruppi, impegnati in diverse mansioni, al fine di procedere in parallelo: il quarto giorno, una volta demolite le pareti danneggiate e creati gli adobe, tutti i team hanno lavorato sulla ricostruzione della casa. Le mansioni erano principalmente tre: la preparazione della miscela per la malta d'allettamento a base di terra; la posa degli adobe; la pulizia e la manutenzione del cantiere stesso.

La malta d'allettamento è stata creata attraverso un impasto plastico composto da terra, sabbia, acqua e paglia.

Per ogni corso di adobe è stato necessario posizionare un filo, il quale ha permesso di determinare la corretta altezza dei mattoni, mentre, con l'aiuto della livella metrica, si è controllato la verticalità del corso rispetto a quelli sottostanti, e altresì che fosse mantenuta l'orizzontalità con i mattoni laterali.

Come prevenzione anti-sismica si è deciso di inserire, a forma di "L", tondini di acciaio negli angoli dei muri ogni 3 corsi di adobe (35), aumentando la rigidezza globale della struttura; mentre come irrigidimento per le aperture sono state aggiunte architravi in legno, di 60 cm più larghe rispetto alla finestra/porta (36).

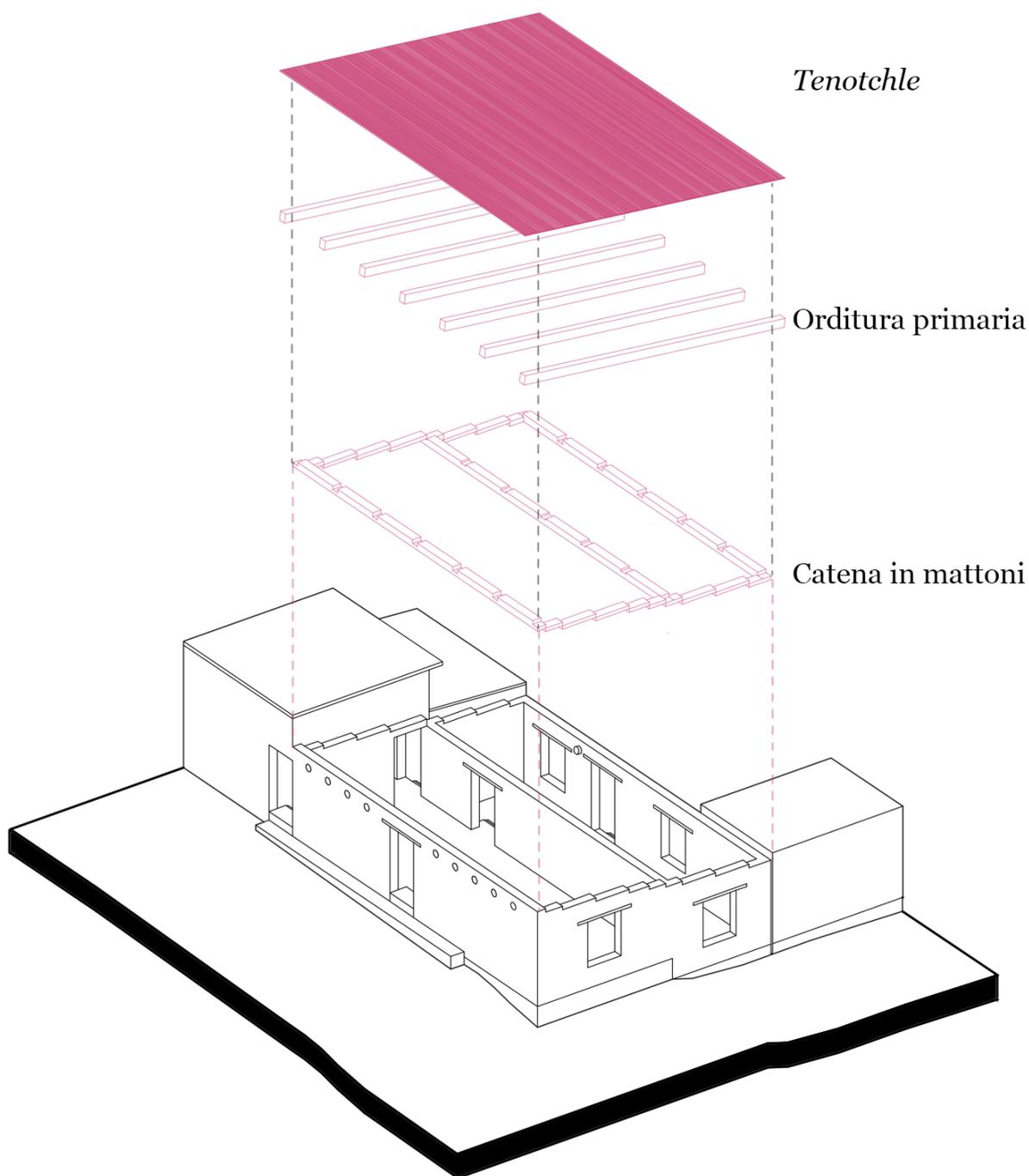


■ Ampliamenti effettuati

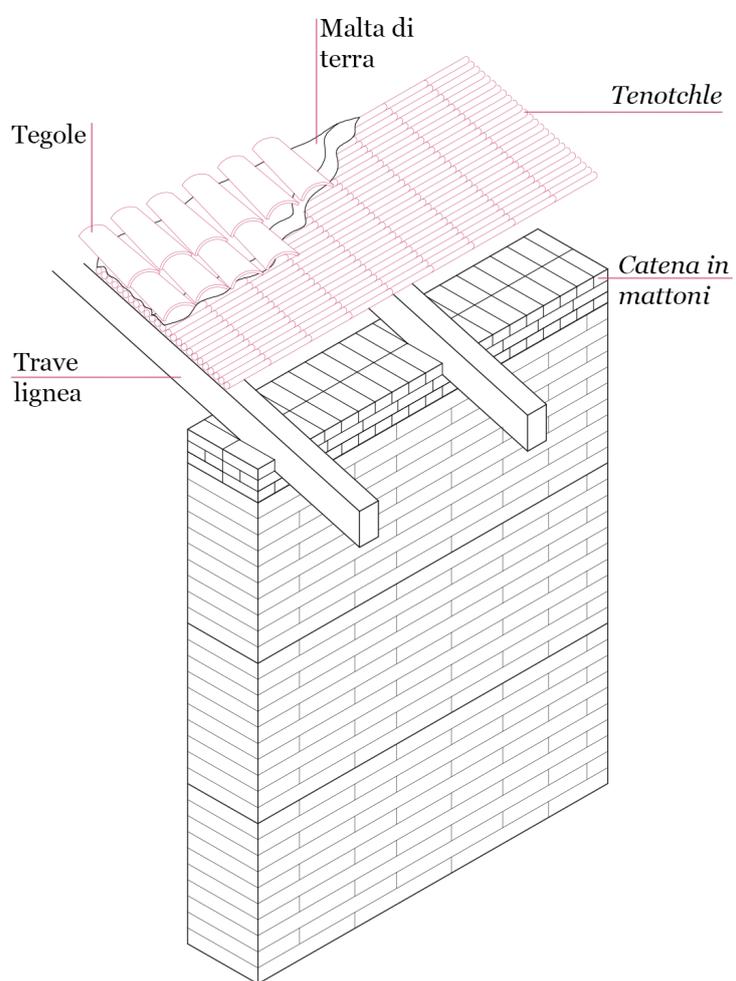
30 ▲ Modello che analizza gli ampliamenti apportati all'edificio.



31 ▲ Parete Sud dove si nota l'inserimento dei tubi in PVC per la ventilazione naturale.



32 ▲ Schema del montaggio della copertura in *tenotchle*.



33 ▲ Dettaglio costruttivo dell'attacco parete copertura.



34 ▲ Foto di una copertura tradizionale in *tenochtle*. Foto di Alvaro Lara, disponibile al seguente link: <https://www.instagram.com/p/BxhloomlZUP/>.



35 ▲ Dettaglio della grappa angolare.



36 ▲ Dettaglio dell'architrave ligneo.

2.3.4 Creazione degli adobe

Nonostante la famiglia avesse già fornito circa 1.000 mattoni in terra cruda, nei primi giorni di workshop se ne sono costruiti altrettanti, in modo tale che, quelli che fossero avanzati, sarebbero stati disponibili per un successivo ampliamento. Gli adobe sono stati prodotti a partire da vecchi mattoni riciclati dalle case della comunità crollate durante il sisma. Questo per una questione economica, sostenibile e di comfort visivo, infatti provenendo dalla stessa zona - quindi avendo la stessa composizione chimica - si adattano meglio alle pareti preesistenti.

I nuovi mattoni sono composti dalla terra dei vecchi adobe, paglia e come antibatterico, sterco di vacca (in alcuni casi si può occupare anche quello di capra o, addirittura urina di cavallo).

Gli adobe rimossi in fase di demolizione vengono frantumati in terra, che viene passata all'interno di un setaccio a maglie strette, escludendo così particelle di ghiaietto (aggiunto in una seconda fase) (37).

La paglia (38) viene tagliata in fili di circa

10 cm e lo sterco viene frantumato finemente (39). Il contributo della paglia è di tipo strutturale poiché garantisce una maggior coesione tra le particelle di terra aumentando la resistenza a trazione del blocco, evitando altresì l'eventuale sgretolamento nel caso di un evento tellurico.

Normalmente la miscela, successivamente mescolata con l'acqua, è formata da 4 dosi di terra, 1 dose di ghiaia fine, 1 dose di sterco, 1/2 dose di paglia.

Per la creazione della miscela si inizia ricreando una forma a cono con la terra, simile ad un cratere del vulcano (40), con apertura centrale dalla dimensione compresa tra gli 80 e i 100 cm dove vengono posizionati gli altri materiali, assieme all'acqua, la quale viene aggiunta in piccole quantità mescolando il tutto mediante l'utilizzo di una pala. Dopo due ore, quando l'acqua sarà stata assorbita dalla terra, si procede con il pestare la miscela a piedi nudi (41): è necessario che il prodotto finale sia un impasto plastico facilmente modellabile, e che non contenga grumi di terra non idratata, i quali causerebbero problemi

durante la posa negli stampi degli adobe. Durante questa fase è consigliabile lavorare sopra a un battuto di cemento oppure, come nel nostro caso, posizionando un telo di nylon, in quanto la terra setacciata non deve mescolarsi a terra con caratteristiche meno performanti.

La miscela così formata viene colata in stampi di legno, i quali verranno immersi prima e dopo ad ogni creazione di un adobe, in modo tale da tenere gli stampi sempre inumiditi. Prima di posizionare la miscela all'interno degli stampi è necessario cospargere il battuto - sopra al quale verranno fatti riposare durante tutta l'essiccazione gli adobe - di un sottile strato di ghiaia fine, così da facilitare la rimozione a fine essiccazione. Posizionato lo stampo di legno a terra, si procede al suo riempimento con la mescola (42): è necessario cercare di muoverlo il meno possibile poiché in questa fase la mescola deve essere "lanciata" energicamente all'interno dello stampo e battuta con altrettanta forza a mano o con uno strumento apposito, al fine di far aderire l'impasto alle pareti dello stam-

po ligneo senza creare punti di vuoto nei quali, ad essiccazione avvenuta, il mattone possa cedere. Particolare accortezza per quanto riguarda gli angoli dello stampo, che se risultano non sufficientemente compatti potrebbero cedere e rendere di fatto inutilizzabile il blocco in fase di posa. Lo strato di finitura viene effettuato o tramite un travetto ligneo, eliminando l'eventuale terra in eccesso, o "massaggiando" (43) la miscela con i palmi delle mani bagnati creando una superficie il più possibile liscia (44).

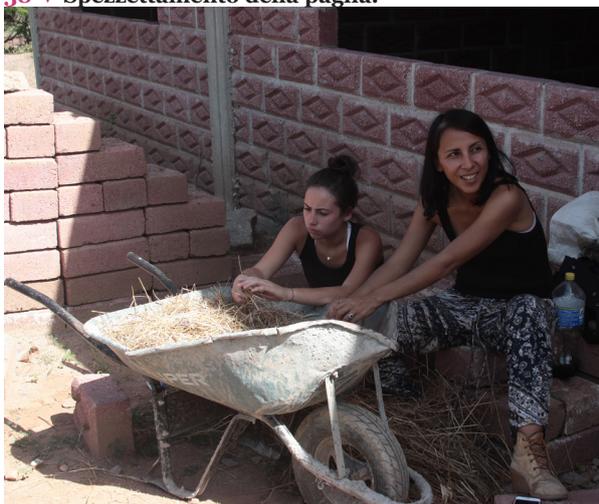
Nonostante la fase di essiccazione duri all'incirca 6 mesi (45) dopo alcuni giorni, il mattone si sarà già indurito e sarà possibile posizionarlo di taglio sul lato lungo, in maniera tale che si ventili e asciughi omogeneamente. Durante i sei mesi è preferibile tenere i mattoni in luoghi asciutti e ombreggiati, evitando il contatto con il sole che potrebbe creare lesioni del blocco e diminuire la resistenza in fase di posa.



37 ▲ Setaccio della terra per la creazione degli adobe.



39 ▲ Frantumazione dello sterco animale.



38 ▼ Spezzettamento della paglia.



40 ▼ Il cratere con all'interno la miscela degli adobe.



41 ▲ La fase di mescolamento manuale dell'impasto.

42 ▼ Riempimento dello stampo con l'impasto.



43 ▲ Livellamento dell'impasto nello stampo.

44 ▼ Rimozione dello stampo in legno.





45 ▲ Essiccazione degli adobe.

2.3.5 Considerazioni sulla *vivienda*

Sebbene ci sia stata l'intenzione di progettare e realizzare una *vivienda* con caratteristiche antisismiche (impiegando una copertura di tipo leggero, una catena superiore in mattoni cotti, corrette proporzioni delle aperture e i tondini come irrigidimento strutturale), queste caratteristiche sono risultate precarie, non incrementando il comportamento antisismico dell'abitazione. In particolar modo, i tondini d'acciaio annegati nella malta in terra, fanno pochissima presa, non comportandosi in maniera equivalente rispetto ad una malta cementizia. Inoltre, non essendo un acciaio di tipo galvanizzato, quest'ultimo tenderà a corrodersi a causa dell'ambiente alcalinico che si creerà all'interno della malta in terra. Per un corretto posizionamento di barre in acciaio sarebbe opportuno lasciare almeno 2 cm di malta al di sopra e al di sotto di esse; così facendo però si otterrebbe un totale di quasi 5 cm di malta d'allettamento, la quale è da considerarsi come la parte "morbida" della parete in adobe e quindi la meno resistente in caso di sisma. Ne consegue che il posizionamento di barre orizzontali non è mai una soluzione adeguata in caso di sismi.

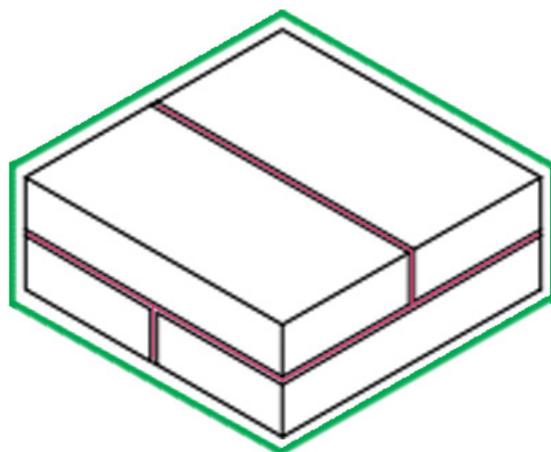
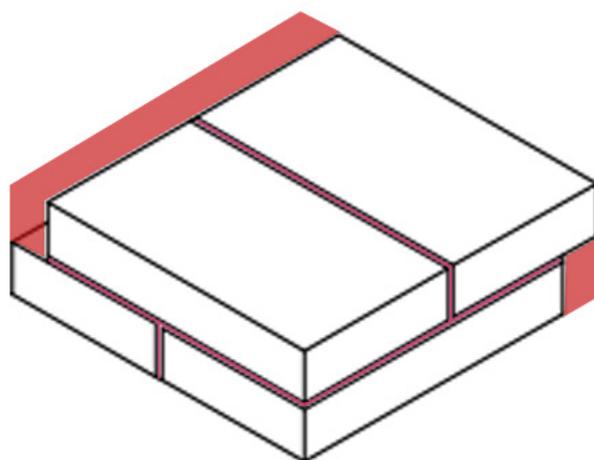
Si è trattata in maniera scorretta la progettazione della pianta dell'edificio, poichè mentre prima i vari ambienti avevano una forma più quadrata, dopo l'ampliamento avvenuto durante la ricostruzione, si è ottenuta una pianta dalla forma rettangolare. Questo fa sì che l'intera struttura sia di tipo allungato, con relativa perdita di stabilità nei confronti delle azione sismiche. Sarebbe stato opportuno nella fase di ricostruzione mantenere i muri **6** e **7 (27)**, con relative aperture in modo tale da ottenere un maggior irrigidimento della struttura senza rinunciare alla possibilità di ampliamento della *vivienda*.

Un'altra critica va fatta nei confronti dell'ideale portato avanti dall'associazione TKli, ovvero la volontà di mantenere le parti di struttura non crollate dopo l'evento del 19 Settembre. Basicamente, poichè la struttura dopo l'avvento di un sisma perde parte della sua capacità resistente nei confronti degli sforzi tellurici, le parti mantenute, sebbene collegate adeguatamente a quelle di nuova costruzione, non avranno mai una resistenza comparabile a quest'ultime. Ma se anche

si fosse deciso di costruire da zero la *vivien-*
da sarebbe insorto un altro problema rela-
tivo ai blocchi di adobe da noi utilizzati. Se
avessimo voluto disporre gli adobe in modo
tale che il lato più lungo di essi determinas-
se lo spessore della parete - nel nostro caso
lo spessore della parete era dato dal lato più
corto, ovvero 25 cm - durante il posiziona-
mento del corso superiore degli adobe, i due
corsi non avrebbero avuto un allineamento
corretto (46). Per ottenerne uno corret-
to sarebbe stato necessario utilizzare uno
stampo che ci avrebbe restituito un adobe
dalle dimensioni di 22x45x8 cm. In questo
modo si sarebbe ottenuto uno spessore uti-
le del muro di 45 cm, il quale resisterebbe
maggiormente agli sforzi sismici.

Un ultimo appunto va fatto sulla copertura,
la quale, sebbene risulti essere di tipo leg-
gero, è ad una falda e quindi esercita delle
spinte modeste in caso di sisma; inoltre la
luce risulta essere eccessiva per un tetto ad
una falda. Sarebbe stato opportuno creare
un tetto a quattro falde, il quale avrebbe ri-
partito la spinta del peso proprio sulle quat-
tro pareti perimetrali. Oppure si sarebbe

dovuto rendere la copertura indipendente
in modo tale che potesse scaricare il peso
su dei pilastri in calcestruzzo, separati dalla
nostra struttura in adobe (Keable, J., 1996).



46 ▲ In alto lo scorretto allineamento dei corsi di adobe da noi utilizzati (dim. 25x45x8 cm), in basso il corretto allineamento dato dagli adobe con dimensione di 22x45x8 cm.

2.4 10 cause di cedimento

Vengono di seguito elencate alcune cause di cedimento strutturale che si riscontrano sovente nelle abitazioni in terra cruda (*Keable, J., 1996*), seguite da delle raccomandazione per aumentare la resistenza sismica del suddetto edificio secondo alcuni riferimenti letterali. Queste, in alcuni casi, sono state adottate durante la costruzione della nostra *vivienda*.

1. Assenza di catena superiore. Ovvero l'assenza di un elemento rigido a chiusura superiore dell'edificio. Può essere rappresentata da una trave lignea o da un chiusura orizzontale in mattoni cotti.

2. Architravi che non penetrano sufficientemente nella struttura muraria. E' molto importante che gli architravi penetrino da ambo i lati di almeno 30 cm.

3. Distanza tra le aperture inadeguata. È molto importante che la distanza tra le aperture sia il più ampia possibile. Nello specifico non deve essere minore di 60 cm.

4. Adeguata distanza delle aperture dall'angolo. È infatti opportuno che le aperture siano adeguatamente distanziate dagli angoli, almeno di 100 cm.

5. Assenza della piattaforma di fondazione. È molto importante che si costruisca una fondazione in cemento o in pietra e mattoni, di modo tale che essa assorba parte delle vibrazioni dovute all'evento sismico.

6. Aperture troppo ampie. Le aperture devono avere una larghezza contenuta

per limitare l'area "vuota" del muro e dare maggior resistenza alla struttura. Inoltre è doveroso controllare che ci sia una corretta proporzione tra le parti "piene" della parete, ovvero gli adobe, e i "vuoti", nicchie o aperture.

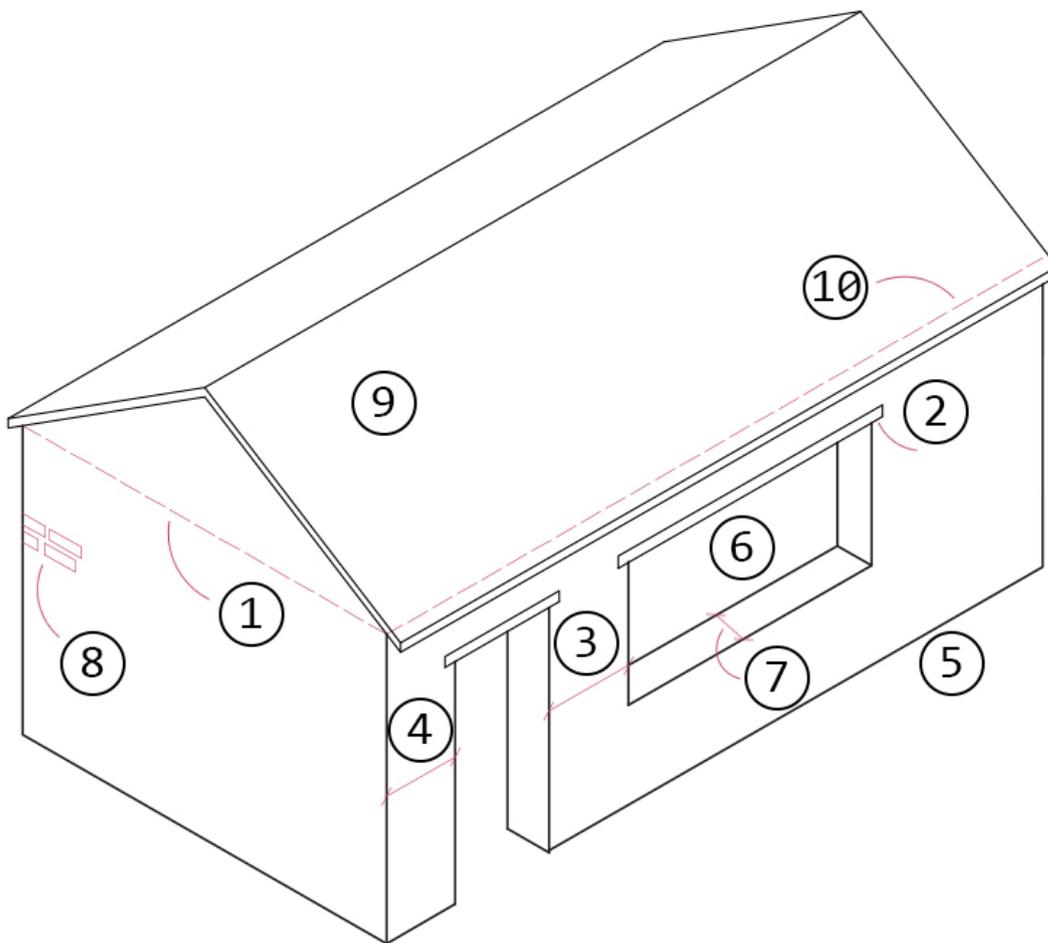
7. Pianta irregolare. È opportuno controllare la lunghezza delle pareti oltre che il disegno in pianta dell'edificio; è infatti preferibile la pianta a forma quadrata e non rettangolare, con muri corti e massivi per poter resistere meglio agli sforzi sismici.

8. Qualità e quantità della malta dall'allettamento. È opportuno controllare che la capacità legante della malta sia elevata e che non se ne usi un quantitativo eccessivo; è sufficiente uno spessore di pochi millimetri per garantire un'ottima presa tra gli adobe.

9. Tetto pesante. Bisogna cercare di progettare il tetto con un materiale il più leggero possibile. Questo perché un tetto pesante grava su tutta la struttura. In caso di sisma se le pareti cedono e crolla il tetto diventa molto pericolosa una copertura pesante,

poiché potrebbe diminuire l'incolumità degli inquilini.

10. Tetto non ancorato adeguatamente. Come detto nel punto 1, è molto importante la catena superiore poiché oltre ad irrigidire le pareti sottostanti, permette di scaricare le oscillazioni della copertura dovute ai movimenti sismici. È quindi opportuno che il tetto e la catena superiore siano collegate saldamente tra loro. Una soluzione ancora migliore sarebbe quella di creare una copertura isolata che appoggia su dei pilastri esterni alla struttura principale della casa. In questo modo il tetto e le pareti sono liberi di oscillare a due frequenze differenti (47).



47 ▲ **Modello che espone le 10 cause di cedimento.** Rielaborazione grafica di Gernot Minke, *Building with Earth: design and technology of a sustainable Architecture*, p. 138.

2.5 Elementi sismoresistenti

2.5.1 Fondazioni

Il compito principe delle fondazioni è quello di distribuire il carico dell'edificio sul terreno. Risulta quindi molto importante la buona realizzazione delle stesse. Mentre per gli edifici comuni sono fatte generalmente in calcestruzzo armato, nelle case in terra cruda possono essere realizzate in mattoni e pietra, o ancora in terra cruda (*Keable, J., 1996*). Per la costruzione delle fondazioni è innanzitutto necessario trovare un buon tipo di terreno, dove il sottosuolo sia formato da rocce e ghiaia, oppure di sabbia compatta (T5). In seguito è importante che sia che esse siano protette in maniera adeguata con una barriera a vapore, sia che venga data una minima inclinazione al terreno adiacente alla muratura, per evitare che esso si bagni e che ristagni l'acqua piovana, con conseguente idratazione delle fondazioni e danneggiamento delle pareti esterne. Sempre per ovviare a questo problema sarebbe opportuno disporre uno strato di ghiaia intorno alla base del muro (*Keable, J., 1996*).

Se si opta per una fondazione in cemento, prima del getto delle fondazioni, è consiglia-

bile controllare se la composizione del suolo non presenti tracce di solfati, in quanto questi ultimi potrebbero reagire con la composizione chimica del cemento. Un cemento a composizione chimica resistente ai solfati potrebbe avere un costo eccessivo, e quindi utile tenere in considerazione una fondazione alternativa migliore sia per prestazioni che per costo meno esoso (*Keable, J., 1996*).

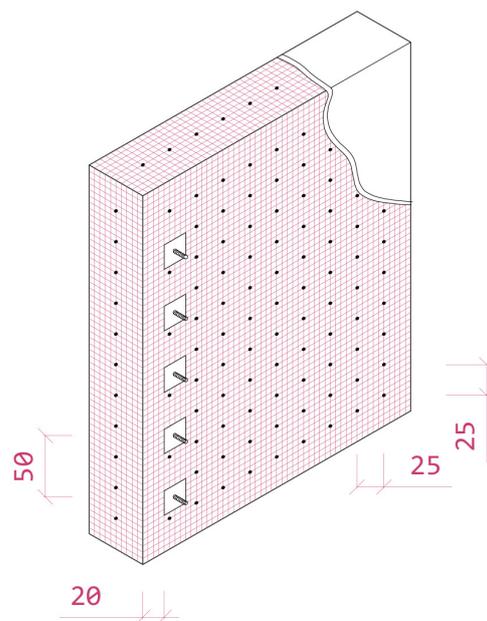
Tipo di sottosuolo	Materiale	Condizione del sottosuolo	Larghezza della fondazione	Spessore della fondazione
I	roccia	Non inferiore come durezza all'arenaria, calcare o al gesso solidificato	Uguale a quella del muro	n/a
II	Ghiaia, sabbia	compatto	Uguale a quella del muro	n/a
III	Argilla, argilla sabbiosa	duro	0,4 m	$(F-W)/2$ o minimo uguale alla larghezza del muro
IV	Argilla, argilla sabbiosa	solido	0,5 m	$(F-W)/2$ o minimo uguale alla larghezza del muro
V	Sabbia, sabbia limacciata, sabbia argillosa	disaggregato	0,75 m	
VI	Limo, argilla	Morbido	0,8 m	
VII	Limo, argilla	Molto morbido	1 m	

T5 ▲ Tabella dei tipi di suolo. Dove: F= larghezza della fondazione e W= larghezza del muro. Rielaborazione grafica di Julian Keable, *Rammed Earth Structures, a code of practice*, p. 58.

2.5.2 Maglia strutturale

In Perù dopo il sisma avvenuto il 23 Giugno del 2001 si notò come 5 vivande costruite in adobe si comportarono in maniera elastica e non subirono danni eccessivi rispetto agli edifici circostanti (*Jaguaco Canchig, S. del Rocio, 2007*). Era stato adottato un irrigidimento strutturale con una maglia in acciaio apposta sulla parte esterna della parete. Per agganciarla erano stati creati dei fori nel muro, nei quali si inserì un *connettore* (un tondino di 90 centimetri di lunghezza). Questi ultimi connettori vengono solitamente inseriti a 20 cm di distanza dagli angoli della struttura per irrigidirla maggiormente e ogni mezzo metro in altezza; successivamente si procederà al riempimento con una miscela a base cementizia. La maglia di acciaio si aggrapperà quindi a questi connettori e anche a dei chiodi nel muro che si metteranno ogni 25 cm tra loro **(48)**. Infine, il tutto verrà ricoperto da un intonaco a base sabbiosa.

La seguente tecnica permette un irrigidimento strutturale ottimo per architetture preesistenti o ex-novo, presenti in zone ad elevato rischio sismico.



48 ▲ Schema della maglia strutturale metallica, coperta con intonaco.

2.5.3 Aperture

I vani di porte e finestre in qualunque costruzione destabilizzano la struttura.

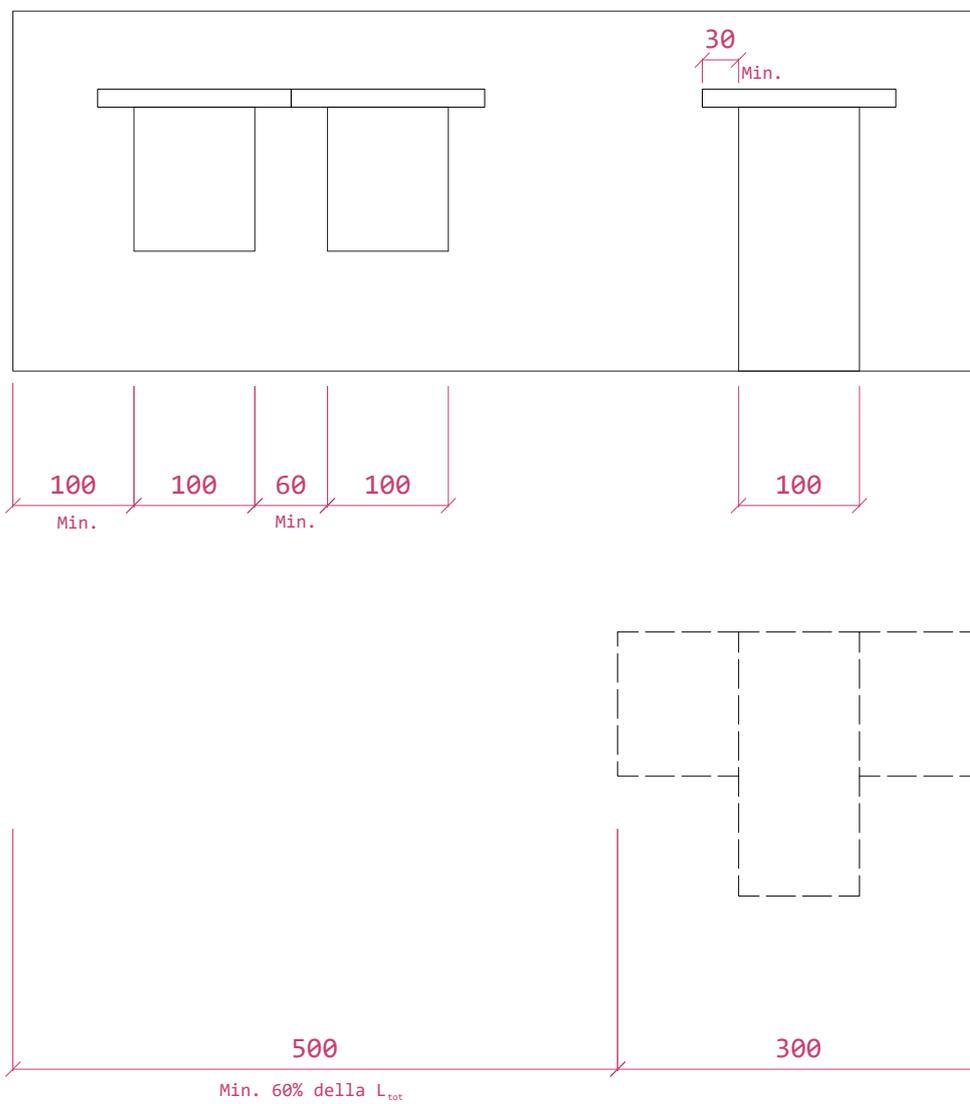
Durante un terremoto, infatti, si creano crepe diagonali in corrispondenza degli angoli del vano e orizzontali sopra gli architravi. Per questa ragione è importante che i suddetti architravi penetrino nella parete di almeno 60 cm (*Keable, J., 1996*). Un'alternativa che garantisce stabilità ancor maggiore è l'impiego di una catena intermedia lignea (spesso chiamata anche dispersore), che abbraccia la struttura lungo tutto il perimetro. Lo stesso dicasi nei confronti degli architravi, i quali possono trasformarsi in catena superiore, circondando tutto l'edificio e diventando la parte sommitale delle pareti esterne.

Una alternativa alle catene lignee può essere quella di creare degli archi in terra cruda anziché utilizzare degli architravi orizzontali in legno. Sono un metodo ormai poco utilizzato in qualsiasi tipo di architettura ma permettono un miglior trasferimento dei carichi nella struttura.

Di seguito sono raccolte delle “buone nor-

me” per la realizzazione delle aperture (49) (*Keable, J., 1996*):

- In un muro la luce totale delle aperture deve sempre essere minore o uguale ad $1/3$ della luce totale del muro: $L_a \leq 1/3L_m$.
- Le aperture non devono essere posizionate troppo vicino agli angoli o alle congiunzioni con altri muri. Più precisamente devono distare almeno 100 cm o comunque più di $1/3$ dell'altezza del muro in terra cruda: $d \geq 1/3h \geq 100$ cm.
- I vani finestra non devono avere una larghezza maggiore di 120 cm.
- Per questione di sicurezza è consigliabile lasciare che l'apertura delle porte dia verso l'esterno e predisporre una porta al lato opposto rispetto a quella principale da utilizzare in caso d'emergenza, favorendo un flusso facilmente intuibile in caso di pericolo imminente.



49 ▲ **Schema delle aperture.** Rielaborazione grafica di Julian Keable, *Rammed Earth Structures, a code of practice*, p. 109.

2.5.4 Copertura

Le coperture degli edifici in terra cruda rivestono un ruolo di fondamentale importanza. Innanzitutto devono evitare infiltrazioni esterne, per impedire che le pareti si degradino, ma soprattutto è importante che siano il più leggere possibile; questo perché se avessero un peso eccessivo gli sforzi orizzontali si trasferirebbero alle pareti, causando l'eventuale collasso. È quindi altamente sconsigliabile utilizzare elementi lapidei per le falde del tetto.

Generalmente per una questione antisismica si raccomandano tetti a quattro falde, di modo che ogni singola falda abbia un peso più contenuto e lo ridistribuisca in maniera omogenea a tutti i muri che la sostengono.

I tetti a due falde sono invece sconsigliati poiché sotto l'effetto dei movimenti sismici, le forze orizzontali generate andrebbero a impattare sull'asse del timpano portando al collasso della copertura. In caso non fosse possibile evitare la costruzione di un tetto a due falde, è consigliabile predisporre dei contrafforti che andranno ad aumentare la stabilità e la sicurezza totale della copertura (Keable, J., 1996).

I tetti ad una falda, invece, sono consigliati solamente se si hanno luci piccole da coprire. Le travi primarie devono essere fissate in maniera appropriata alla catena superiore, cosicché il tetto presenti una stabilità maggiore.

La soluzione, senza dubbio migliore, è quella di costruire un tetto che appoggi su pilastri isolati, ovvero staccati dalla struttura dell'edificio in terra cruda. Questo perché l'oscillazione a cui sono sottoposti i muri di un edificio è differente da quella a cui è sottoposta la copertura. Isolando così gli sforzi sismici prodotti dal movimento del tetto, il muro potrà muoversi ad una determinata frequenza, mentre i pilastri assieme alla copertura oscilleranno liberamente. I pilastri dovranno essere collegati alla fondazione (Keable, J., 1996).

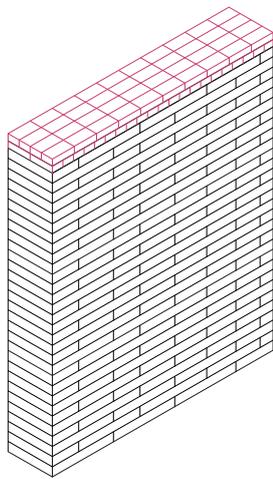
In alcuni casi si può anche ricorrere ad una copertura composta solamente dalle travi principali e da canne di bambù. È importante che quest'ultime vengano posizionate e legate in maniera molto fitta, poiché sopra ad esse verrà steso uno strato di terra. Alla miscela di terra può essere aggregata della

pomice per far sì che risulti più leggera. Infine, al di sopra dell'impasto di terra devono essere posizionate, pochi istanti dopo, le tegole in argilla. In questa maniera la malta farà presa sulle tegole che rimarranno saldamente incollate alla base di canne, garantendo così una resistenza ottimale alle intemperie.

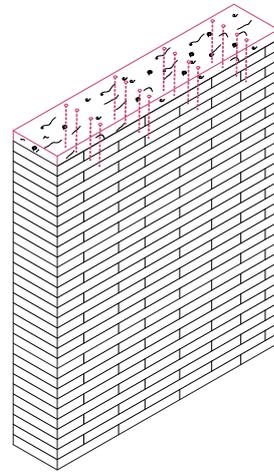
2.5.5 Catena superiore

In una struttura in adobe la catena superiore può essere realizzata o con una normale travatura lignea legata ai blocchi sottostanti con una malta in terra; oppure utilizzando dei mattoni cotti: in questo caso verranno predisposti almeno due corsi di mattoni sempre legati tra loro con una malta di terra cruda (50). Al di sopra dei mattoni verrà connessa la travatura principale del tetto.

Le catene lignee sono un ottimo metodo per la chiusura verticale del muro. Esse possono altresì essere disposte in variante singola o doppia (51,52): dovranno avere una dimensione non minore di 10x7.5 cm e dovranno essere ancorate ogni 60 cm con almeno 8 viti galvanizzate che saranno inserite all'interno del muro fino ad una profondità di 45 cm, per fare maggior presa (Keable, J., 1996).

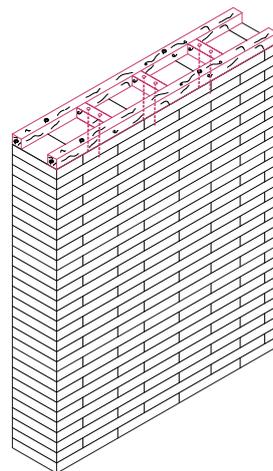


50 ▲ Particolare dell'aggancio della catena superiore in mattoni cotti.



51 ▲ Particolare dell'aggancio della catena superiore linea singola mediante tirafondi.

52 ▼ Particolare dell'aggancio della catena superiore linea doppia mediante tirafondi.



2.6 Memoria fotografica





















3

tecniche di rinforzo antisismico

3.1 Cedimenti strutturali

3.2 Rafforzamenti strutturali

3.2.1 Griglia di bambù

3.2.2 Applicazione di georeti

3.2.3 Griglia d'acciaio

3.2.4 Griglia lignea

3.2.5 Maglia in juta

3.2.6 Rinforzi lignei angolari

3.2.7 Rinforzo angolare con
geomaglia

3.1 Cedimenti strutturali

In questo capitolo vengono introdotte delle metodologie di rafforzamento strutturale a seguito di letture di articoli di provenienza globale i quali analizzano tecniche di rafforzamento strutturale in ambienti ad alta sismicità, simili a quello in cui abbiamo costruito assieme all'associazione TKli. Vengono quindi messi in rapporto i meccanismi di cedimento con le varie metodologie di rafforzamento strutturale analizzate.

Quando si costruisce in una zona sismica è molto importante scegliere un materiale con un'ottima duttilità, il quale possa garantire un'elevata capacità di dissipazione dell'energia, attraverso la sua deformazione plastica, dopo aver raggiunto lo sforzo massimo. La deformazione plastica è quindi fondamentale per garantire che il materiale non perda la sua resistenza agli sforzi prodotti dal sisma; in questa maniera si può ritardare il collasso strutturale, permettendo alle persone all'interno dei locali di evacuare con largo anticipo la struttura.

Purtroppo gli edifici in terra cruda non dispongono di tale deformazione plastica e durante un sisma il collasso avviene in ma-

niera rapida, non permettendo una sicurezza adeguata agli inquilini. I cedimenti sono quindi causati dagli sforzi di flessione esercitati dalle forze orizzontali che agiscono sul muro; questo perché per natura la terra cruda non ha una resistenza alta a questo tipo di sforzi.

Si possono quindi individuare le cause dei vari cedimenti¹⁹ (Gallego, R., Arto, I. 2015), ed elaborare delle soluzioni in base agli svariati metodi di rafforzamento strutturale atti ad irrigidire localmente o globalmente la struttura.

Nel **cedimento dovuto a flessione orizzontale (53)** si generano lesioni diagonali che partono dai vertici verso il baricentro della parete. A causa della spinta orizzontale dovuta al peso del tetto che avviene durante l'evento sismico, la parte lesionata si ribalta, causando talvolta anche il crollo della copertura.

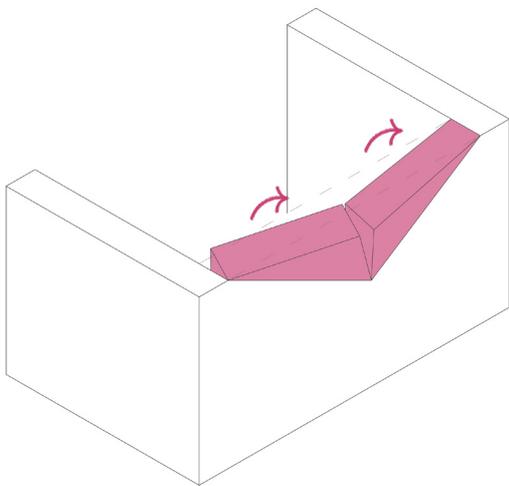
Nel **ribaltamento dei vertici (54)** si è in presenza dalla separazione completa del

¹⁹ Gutiérrez, L., Manco, T., Loaiza, C., Blondet, M. (2003) 'Características sísmicas de las construcciones de tierra en el Perú, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil'.

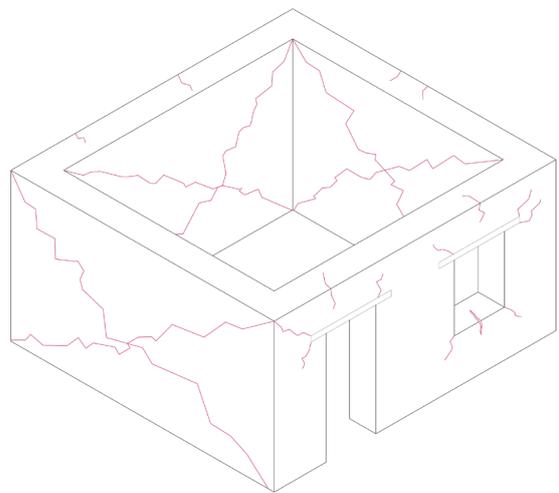
vertice dalla parete di testa ad esso perpendicolare. Questo cedimento avviene a causa della scarsa connessione tra le due pareti.

Nel **cedimento dovuto a taglio (55)** si presentano lesioni a forma di “X”, le quali fessurandosi ulteriormente porteranno al collasso totale della parete. Generalmente queste lesioni si presentano in corrispondenza dei vertici del muro o di quelli delle aperture.

Nel **cedimento dovuto a rotazione (56)** invece, si ha una stretta relazione con i cedimenti flessionali, i quali aggravandosi sotto gli sforzi sismici possono portare alla separazione dei muri, facendoli comportare come solidi indipendenti. Se il momento generato è molto elevato, questo può causare il collasso dell'intero muro. Per evitare queste dinamiche è necessario agire localmente sulle connessioni nei vertici delle pareti, proponendo strumenti di connessione più stabili e rigidi.

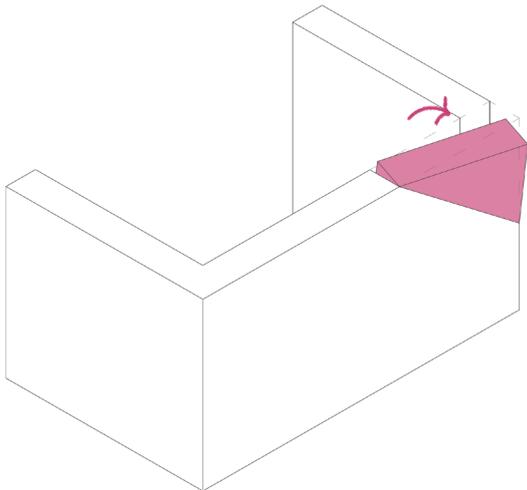


53 ▲ Cedimento della parete a flessione orizzontale.

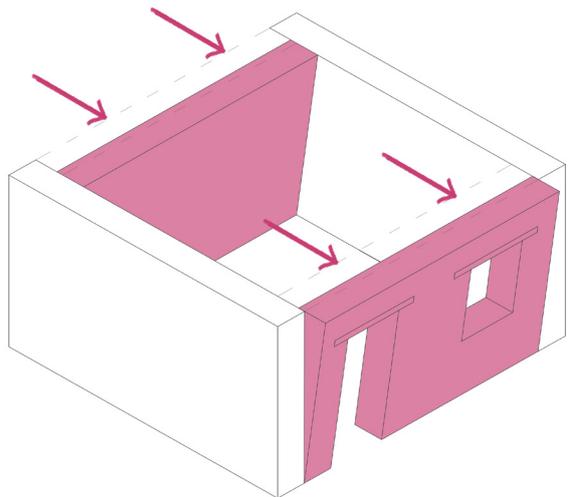


55 ▲ Cedimento dovuto a taglio.

54 ▼ Ribaltamento dei vertici.



56 ▼ Cedimento dovuto a rotazione



3.2 Rafforzamenti strutturali

3.2.1 Griglia in bambù

Nella ricerca condotta dall'Università degli studi di Firenze²⁰ viene analizzata la resistenza di un muro in adobe con aggiunta di una griglia di bambù da ambo le pareti, la quale aiuta a ritardare il collasso delle strutture sotto l'effetto delle scosse telluriche.

Il bambù è un una pianta che cresce in moltissime fasce climatiche in tutto il mondo. Una buona percentuale di queste specie sono invasive, tuttavia, sono facili da lavorare, offrono un buon comportamento in fase tensionale, sono decisamente leggere e facili da trasportare. Inoltre, il bambù è una pianta che ha una capacità rigenerativa elevata: infatti se tagliata, nel giro di 12 mesi torna alle dimensioni iniziali. Troppo spesso questo tipo di pianta viene considerato come “il legno dei poveri” (poiché viene utilizzato dalle popolazioni rurali), anche se le sue sopracitate proprietà lo rendono un materiale sorprendentemente versatile. Nel caso che andrò a presentare, applicato alla parete di adobe, può servire da rinforzo in caso di terremoto.

²⁰ Paradiso, M., Bizzetti, F., Perria, E., Farigu, A., Lotti, O. (2017) *Low-cost adobe structures with bamboo frame additives and bamboo frames. Strength tests*.

Il sistema progettato dal gruppo di ricerca dell'UNIFI²¹ prevede una griglia ortogonale di canne di bambù, legate assieme da corde vegetali. La griglia di bambù (presente in entrambi i lati della parete) è interconnessa da elementi trasversali, formando così una gabbia esterna al muro, la quale ha fondazioni indipendenti da quelle dell'edificio. La scelta di creare delle fondazioni indipendenti nasce dalla volontà di fare in modo che queste due tecnologie lavorino in maniera separata in condizioni normali; ma che al sopraggiungere di un terremoto la gabbia di bambù intervenga evitando il crollo del muro sotto l'azione delle scosse sismiche.

La griglia di bambù viene posizionata su entrambe le pareti, poiché le forze provocate dal terremoto che agiscono sul muro possono avere direzioni differenti (57). Il test a compressione effettuato dall'UNIFI tuttavia è stato eseguito solamente su un lato. Lo scopo era appunto quello di testare la resistenza delle canne di bambù sotto il peso dell'intero muro. Si tratta di un test statico con lo scopo di verificare la collaborazione

²¹ Università degli studi di Firenze.

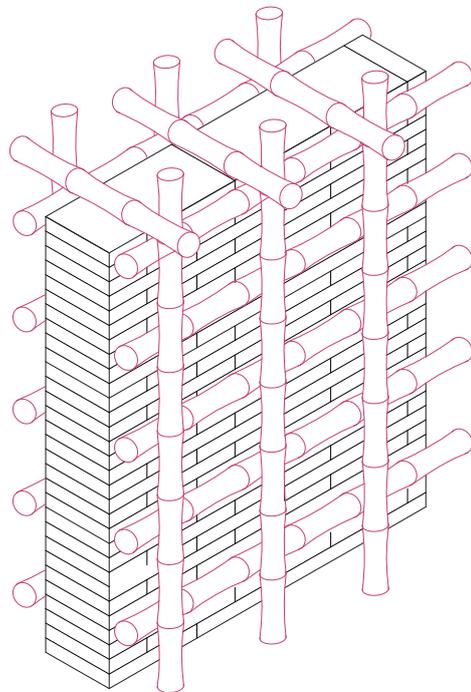
delle due tecnologie costruttive (quella in terra cruda e quel con le canne di bambù) e non di quantificare il limite massimo di collasso della struttura.

Il provino su cui è stato condotto il test è stato realizzato in scala 1:4; quindi, con gli adobe di dimensione 10x10x2,5 cm e le canne di bambù con un diametro di 2-3 cm (a dimensioni normali vengono utilizzate delle canne dal diametro di 8-12 cm) dalla lunghezza di 1 m circa, e con presenza di imperfezioni minima. Le canne sono state legate ortogonalmente ad una distanza di 19 cm (corrispondenti a 75/80 cm nella realtà). La corda vegetale utilizzata deriva da una pianta usata in Colombia e ha una resistenza a trazione pari a 54 MPa (58).

Il provino è stato caricato finché il muro di adobe non ha raggiunto il collasso, con un carico ultimo pari a $F_u = 220$ kg. Durante questo test la griglia di bambù non ha raggiunto il collasso mentre il muro di adobe si è quindi potuto constatare che l'ipotesi iniziale della ricerca è stata verificata con successo: la griglia di bambù non ha raggiunto il collasso strutturale sotto lo sforzo

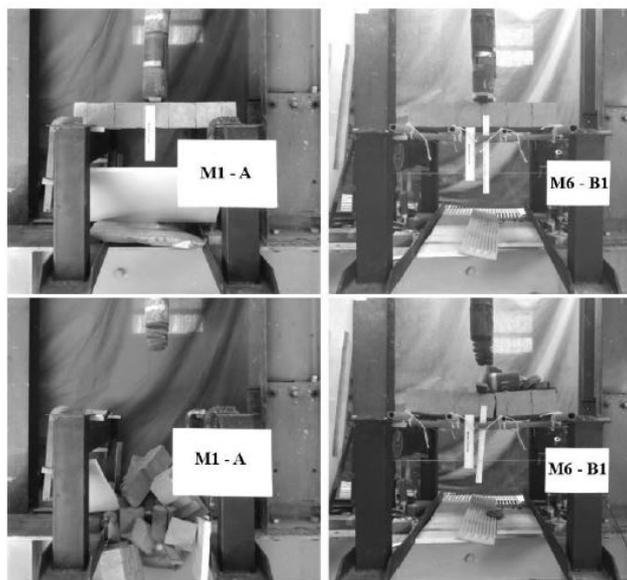
sismico ed è riuscita ad evitare lo sgretolamento della parete di adobe. Quando è stato tolto il carico applicato al provino, la parete è tornata nella posizione iniziale con una deformazione plastica minima (59).

Questo sistema previene quindi il cedimento dovuto a rotazione e al taglio, risultando però ingombrante se comparato all'utilizzo di georeti o altri irrigidimenti che si elencheranno successivamente.



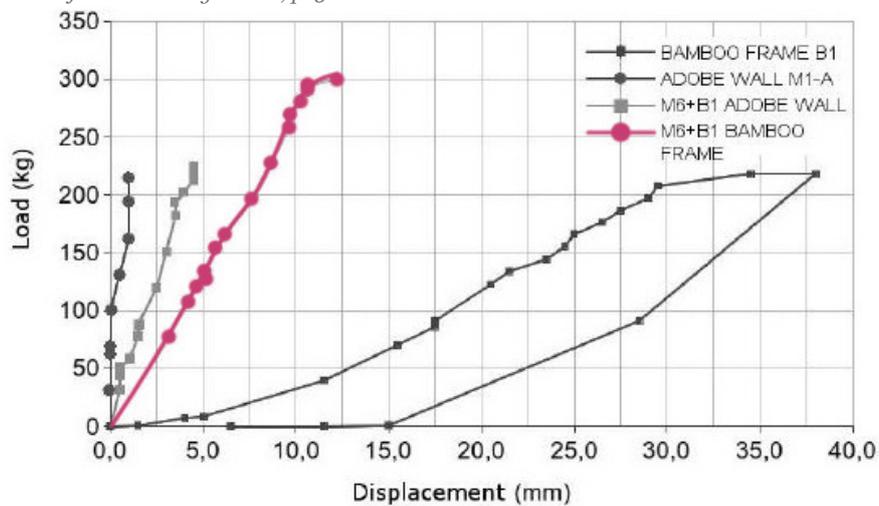
57 ▲ Schema della griglia di bambù.

Rielaborazione grafica di *Low-cost adobe structures with bamboo additives and bamboo frames. Strength tests*, p. 3.



58 ▲ Test a compressione (M1-A: non rinforzato; M6-B1: rinforzato). Immagine di *Low-cost adobe structures with bamboo additives and bamboo frames. Strength tests, p. 5.*

59 ▼ Diagramma dello spostamento del carico. Immagine di *Low-cost adobe structures with bamboo additives and bamboo frames. Strength tests, p. 5.*



3.2.2 Applicazione di georeti

Nella ricerca condotta dal Politecnico di Torino²² riguardo all'utilizzo di georeti come rinforzo strutturale si evince come questa tecnologia possa portare ad applicazioni interessanti in ambito di rinforzo strutturale, soprattutto nei casi di un possibile intervento di restauro, o di un'applicazione post sisma.

La maglia strutturale in georete è stata testata per essere applicata al di sopra del muro, quindi può tranquillamente essere applicata ad un edificio esistente e non necessariamente ad un ex-novo. La particolarità di questa maglia è che a differenza di quella in acciaio o in materiale plastico, non necessita di una connessione diretta alla parete, ma svolge il suo compito di rinforzo in maniera indipendente. Essa infatti viene applicata contemporaneamente alla malta di finitura; che può essere considerata di tipo strutturale. La georete scelta per l'applicazione è utilizzata in campo edile per la tenuta dei muri controterra; è stata offerta

²² Invernizzi, S., Mattone, M., Vachey, P., Gentile, M. (2017) 'Experimental study of adobe walls with geogrid reinforced mud plaster'.

dalla società italiana PRIMAT²³ la quale ha anche messo a disposizione una malta di finitura che ha un ottimo comportamento alle intemperie e che è stata utilizzata durante i test (60).

Per il test sono state effettuate delle prove di resistenza con l'utilizzo di 3 georeti differenti:

- Rete di resina polimerica senza rinforzo interno (Tenax 3D grid S)
- Rete di fibra di vetro rinforzata (Alpeadria Textil Arter GTS31)
- Rete di resina rinforzata (Alpeadria Textil Arter AG 50-50)

Le prove effettuate sono state: il test a compressione, il test di flessione a tre punti e il test a compressione diagonale; i provini utilizzati erano 3 per ogni tipologia di rinforzo e 9 non rinforzati.

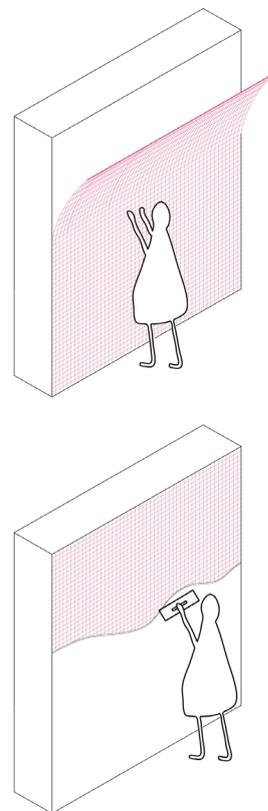
Se nel test a compressione semplice non si nota un'evidente differenza dei risultati ottenuti dai provini rinforzati con le georeti: attestandosi tutti attorno ai 2 Mpa (61,62),

²³ PRIMAT srl è una società attiva nel settore della ristrutturazione, con un settore specializzato nella costruzione in terra cruda.

si nota invece il vero potenziale del rinforzo nei test a compressione diagonale e in quello a flessione a tre punti. Nello specifico, nel test a compressione diagonale si è raggiunto un valore pari a 0,1 MPa per i provini rinforzati: quasi il doppio del valore ottenuto dai provini non rinforzati e un incremento drammatico della deformazione ultima **(63,64)**. Alla stessa maniera, nel test di flessione a tre punti i risultati sono sorprendenti, con un incremento dello sforzo massimo pari a quasi 4 volte nei confronti del provino non rinforzato **(65)**. Inoltre come si può notare **(66)** la georete permette di redistribuire gli sforzi interni del muro: anche quando l'intera parte centrale del muro presenta fessurazioni modeste, la georete attua da "maglia contenitrice" la quale garantisce la stabilità strutturale e l'eventuale collasso del muro in adobe.

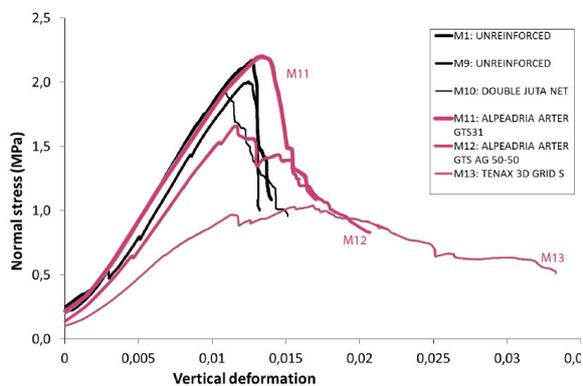
In conclusione la georete applicata ad una struttura in terra cruda risulta essere un'ottima scelta se si vogliono aumentare le caratteristiche meccaniche della struttura soprattutto contro gli sforzi provocati dai sismi; questi ottimi risultati sono stati

ottenuti grazie alla rigidità della stessa maglia strutturale che permette di migliorare sensibilmente il comportamento globale dell'intero muro. Con questa tecnica di irrigidimento strutturale siamo quindi in grado di prevenire in maniera discreta tutti i cedimenti a cui potrebbe essere soggetta una struttura in terra cruda.



60 ▲ Schema della applicazione della malta con geogriglia. In alto l'applicazione della maglia sul primo strato di malta, in basso la rasatura finale.

Compressione semplice

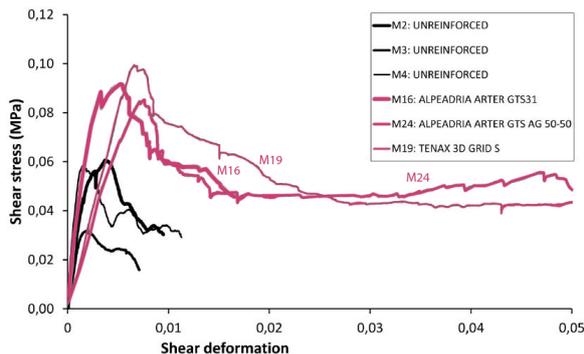


61 ▲ Grafico test a compressione.
Rielaborazione grafica di *Sistema di rinforzo sismoresistente per edifici realizzati in terra cruda*, Tesi di laurea, p. 102.



62 ▲ Prova a compressione su campione non rinforzato.
Immagine di *Sistema di rinforzo sismoresistente per edifici realizzati in terra cruda*, Tesi di laurea, p. 104.

Compressione diagonale

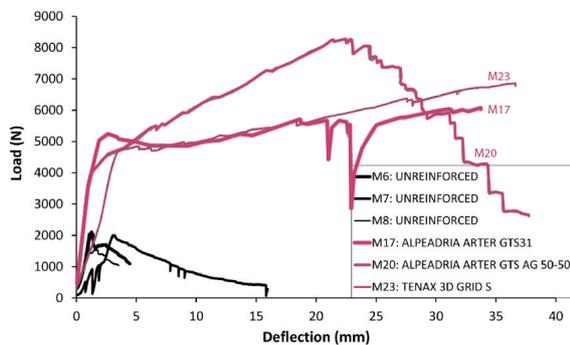


63 ▲ Grafico compressione diagonale.
Rielaborazione grafica di *Sistema di rinforzo sismoresistente per edifici realizzati in terra cruda*, Tesi di laurea, p. 106.

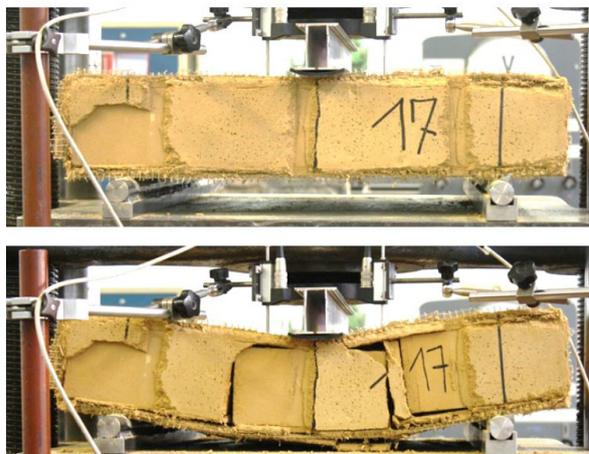


64 ▲ Test di compressione diagonale. A sinistra il provino non rinforzato, a destra quello rinforzato.
Immagine di *Sistema di rinforzo sismoresistente per edifici realizzati in terra cruda*, Tesi di laurea, p. 108.

Flessione fuori piano



65 ▲ Grafico flessione.
Rielaborazione grafica di *Sistema di rinforzo sismoresistente per edifici realizzati in terra cruda*, Tesi di laurea, p. 109.



66 ▲ Test a flessione del provino rinforzato.
Immagine di *Sistema di rinforzo sismoresistente per edifici realizzati in terra cruda*, Tesi di laurea, p. 110.

3.2.3 Griglia d'acciaio

Questo tipo di rinforzo è stato sviluppato grazie alla collaborazione con la PUCP²⁴ e una associazione tedesca tra il 1994 e il 1997; nell'articolo di Blondet²⁵ viene spiegata come questa tecnica di adeguata efficacia possa essere applicata ad edifici esistenti nell'evenienza di un futuro evento sismico.

Durante le prove sismiche in laboratorio si ottenne un ottimo riscontro da parte del posizionamento di una maglia di rete elettrosaldata di acciaio nei punti cruciali della struttura, ovvero nella parte superiore e negli angoli, oltre che attorno a tutte le aperture dell'edificio, creando così una griglia che abbraccia l'edificio sia sull'asse orizzontale che su quello verticale (67).

Lo stesso metodo viene altresì spiegato in maniera esaustiva in un altro articolo redatto da Daneil Ruiz Valencia²⁶. La maglia viene posizionata sia internamente che esternamente e collegata tramite dei tondini

metallici dal diametro di 8 mm, che verranno posizionati su tutta l'area sulla quale insiste la maglia ad una distanza di 20 cm sia orizzontalmente che verticalmente (68). I fori praticati per il passaggio del tondino verranno poi riempiti con una malta composta da calce e sabbia con una proporzione di 1:2. La maglia viene quindi posizionata sulla superficie del muro e connessa ad ogni tondino. Infine, viene stesa una malta di finitura composta della stessa composizione di quella precedentemente utilizzata per riempire i fori praticati nel muro (69).

Questo sistema permette di aumentare il livello di sicurezza sismica globale, giacchè si incrementa la resistenza sismica dei muri, mantenendo sotto controllo lo spostamento e postponendo il collasso strutturale dell'intero edificio. Questo sistema, nello specifico, permette la resistenza di sforzi sismici lievi e moderati. Infatti alcune case costruite con questa metodologia di rinforzo sismico in Bolivia e in Cile resistettero alle scosse telluriche avvenute il 23 Giugno del 2001 con magnitudo di 7,9 gradi nella scala Richter senza alcun tipo di danno; mentre per le

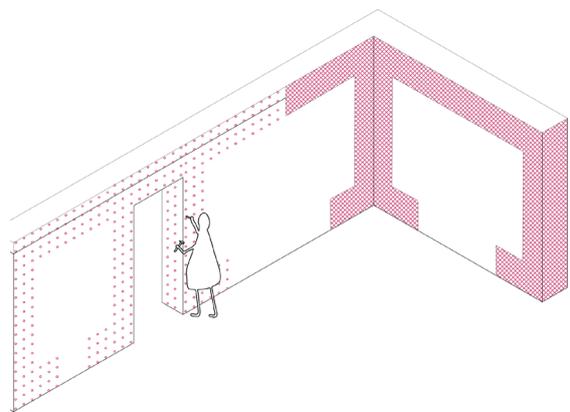
²⁴ Pontifica Universidad Católica de Peru.

²⁵ Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., Iwaki, C. (2011) 'Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú'.

²⁶ Ruiz Valencia, D., López Pérez, C., Rivera, J.C. (2012) 'Propuesta de normativa para la rehabilitación sísmica de edificaciones patrimoniales, Bogotá'.

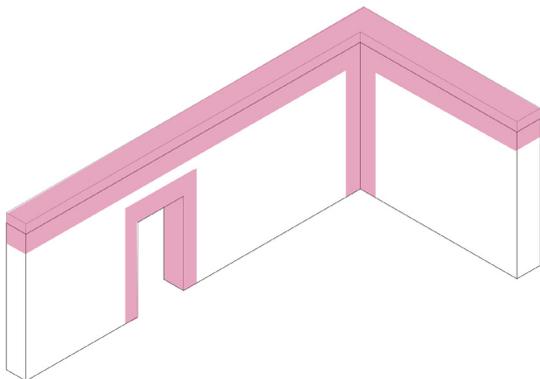
case costruite in normale adobe quindi senza nessun rinforzo, cedettero sotto gli sforzi tellurici sprigionati dal suddetto evento.

Similmente all'irrigidimento mediante la geogriglia, anche questo permette una resistenza nei confronti di tutti i meccanismi di cedimento discreta, seppur minore rispetto a quella citata nel paragrafo precedente, considerata la minor area di azione della griglia.

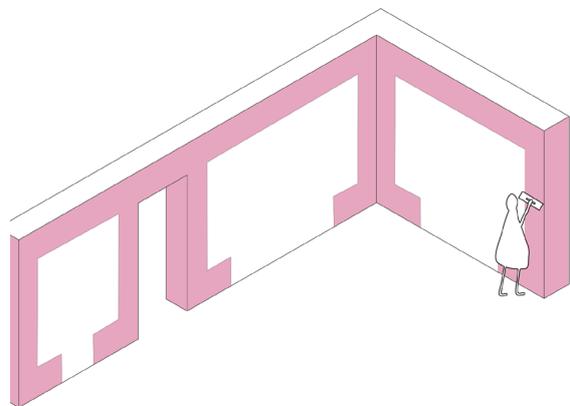


68 ▲ Schema di montaggio della griglia d'acciaio. Rielaborazione di *Manual para la rehabilitacion de viviendas construidas en adobe y tapia pisada*, p. 70.

67 ▼ Schema dei punti critici della struttura. Rielaborazione di *Manual para la rehabilitacion de viviendas construidas en adobe y tapia pisada*, p. 67.



69 ▼ Schema della rasatura finale sulla griglia d'acciaio. Rielaborazione di *Manual para la rehabilitacion de viviendas construidas en adobe y tapia pisada*, p. 71.



3.2.4 Griglia lignea

Questo sistema consiste nella creazione di una struttura simile a quella che si può ottenere con la costruzione di un edificio in bahareque, ma l'applicazione è riservata alle strutture di adobe. Questa tecnica è applicabile anche per una riabilitazione dell'edificio e quindi non necessariamente deve essere applicata ex-novo. La suddetta tipologia di rinforzamento è stata ideata dall'Associazione Colombiana di Ingegneria Sismica²⁷²⁸ ma la sua applicazione è spiegata in maniera molto più approfondita dall'Istituto di Tecnologia Costaricani²⁹.

Il sistema consiste nella installazione di tavole lignee della larghezza di 20 cm e dallo spessore minimo di 2 cm. Si devono disporre in maniera orizzontale e verticale per tutta l'estensione della parete, sia internamente che esternamente; in questa maniera si aumenta la resistenza dei muri rispetto ai movimenti orizzontali causati dal terremoto

²⁷ Yasmin, L.E., Reyes, J.C., Ruiz Valencia, D.M., Phillips, C. (2007) 'Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada'.

²⁸ Yamín Lacouture, L.E., Bernal, C.P., Reyes Ortiz, J.C., Ruiz Valencia, D. (2007) 'Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada', APUNTES vol. 20, n. 2.

²⁹ Hernández-Salazar, I. (2013) 'Restauración de arquitectura de tierra en zonas sísmicas, El caso de Costa Rica'.

e allo stesso tempo la stabilità globale della struttura.

Le tavole vengono quindi collocate su ambo le pareti e fissate mediante tasselli di acciaio galvanizzati o viti di acciaio, in modo che si eviti la separazione dal muro. Vengono altresì collegate tra loro nella medesima maniera con dei tasselli più lunghi che attraversano tutto lo spessore del muro.

Prima di tutto è necessario realizzare una demarcazione per capire come disporre le travi orizzontali e quelle verticali. Bisogna partire dal vertice superiore della parete lasciando 20 cm di distanza dalla prima tavola lignea. Si posizionerà così il primo elemento orizzontale e da quello i successivi (andando verso il basso), ad una distanza di massimo 150 cm, ponendo cura che la ultima tavola disti 50 cm dal vertice inferiore del muro, ovvero quello a contatto col terreno. È consigliato uno spessore delle tavole pari a 2 cm e possibilmente senza fori, fessure o nodi.

Successivamente si realizza la demarcazione degli elementi verticali, i quali dovranno

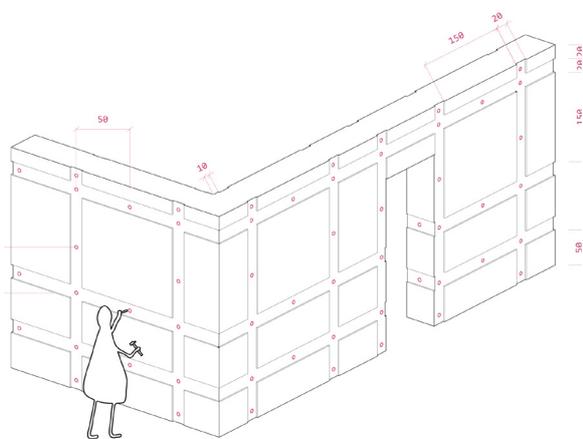
distare di 10 cm dai vertici laterali del muro e un massimo 150 cm tra di loro. È inoltre necessario disporre le tavole verticali nei vertici delle aperture, “marcando” in questa maniera i vertici di porte e finestre.

Finalmente si può procedere a scavare la parete dello stesso spessore e larghezza scelto per le tavole, quindi minimo di 2 cm di spessore e 20 cm di larghezza, in modo tale che gli elementi verticali e orizzontali si inseriscano perfettamente e rimangano a filo con la finitura superficiale della parete. È necessario che questa operazione venga svolta in maniera minuziosa, sia dal lato interno che da quello esterno. Si procede alla perforazione della parete con l’ausilio di un trapano; vengono creati dei buchi che permetteranno di connettere le due tavole di legno, mediante un tassello. Le perforazioni verranno fatte in corrispondenza dei punti di incontro della griglia orizzontale e verticale e ogni 50 cm sull’asse longitudinale della griglia lignea (70). Si possono quindi collocare in opera le tavole verticali e successivamente quelle orizzontali andando a connetterle e bloccarle con i tasselli (71).

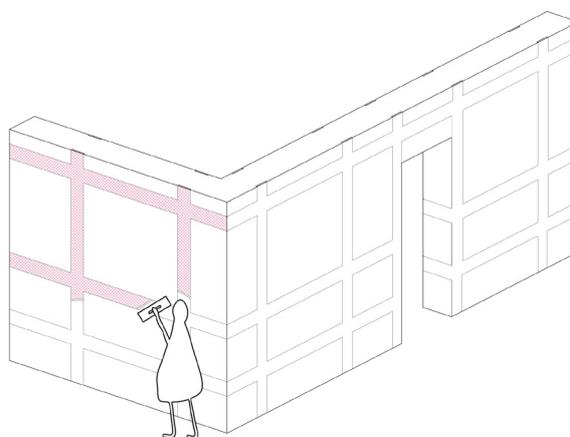
A conclusione di questa fase di montaggio delle tavole, è necessario bloccare tutti gli angoli – sia quelli esterni dell’edificio, sia quelli interni delle aperture – con delle placche metalliche; queste verranno fissate con delle viti INOX (72).

Successivamente alla fase di montaggio, si applicherà una rete metallica su tutta l’area delle tavole (la quale verrà fissata con chiodi o viti) e sopra ad essa sarà stesa una malta a base di terra, calce e sabbia. Infine, su tutte le pareti si potrà applicare una pittura o un ulteriore strato di malta per dare una texture uniforme al nostro edificio (73).

La griglia permette quindi un’ottima resistenza nei confronti dei cedimenti a taglio, flessione e ribaltamento, mentre non ci sentiamo di consigliare questo tipo di irrigidimento per contrastare gli sforzi di rotazione, per i quali sarà necessario un irrigidimento aggiuntivo, al fine di garantire una stabilità maggiore.

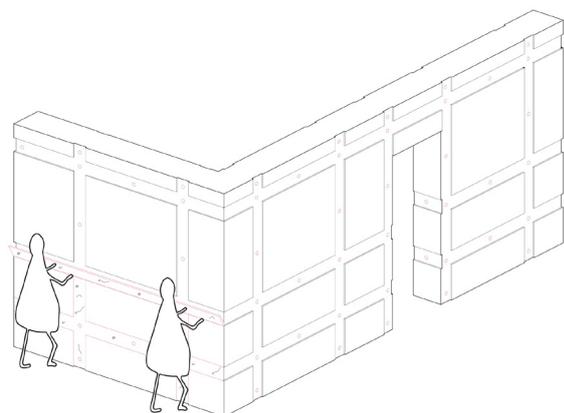


70 ▲ Schema delle perforazioni praticate nel muro di terra cruda per l'inserimento della griglia lignea.
Rielaborazione di *Manual para la rehabilitacion de viviendas construidas en adobe y tapia pisada*, p. 76.

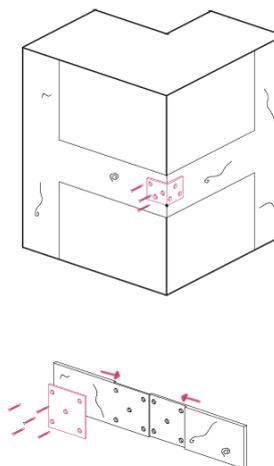


72 ▲ Schema della rasatura della griglia lignea.
Rielaborazione di *Manual para la rehabilitacion de viviendas construidas en adobe y tapia pisada*, p. 80.

71 ▼ Schema di installazione delle tavole lignee.
Rielaborazione di *Manual para la rehabilitacion de viviendas construidas en adobe y tapia pisada*, p. 78.



73 ▼ Schema delle placche metalliche di giunzione.
Rielaborazione di *Manual para la rehabilitacion de viviendas construidas en adobe y tapia pisada*, p. 79.



3.2.5 Maglia in juta

La seguente ricerca verte sull'utilizzo della juta come rinforzo strutturale da applicare tra i corsi di mattoni nella nostra struttura in adobe. La seguente opzione di rinforzo strutturale per la terra cruda è stata sviluppata dal Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'UNIFI³⁰.

Il test è stato condotto utilizzando materiali locali, quali la terra di Musciano (PI) estratta ad una adeguata profondità per non incorrere in sostanze organiche (50 cm minimo) e le fibre di juta estratte da una pianta locale chiamata *Corchorus*: essa conteneva quantità di cellulosa pari al 58-63%, di emicellulosa pari al 20-24% ed infine lignina pari al 12-15%. Per il test a compressione semplice si sono utilizzati dei mattoni di terra cruda dalle dimensioni di 24x12x6 cm. Il test è stato effettuato creando 3 corsi di mattoni uniti con una miscela di terra, gesso e acqua per i provini non rinforzati, mentre per i provini rinforzati tra la malta è stato inserito uno strato di juta (74). A essiccazione compiuta si è potuto effettuare

il test a compressione semplice. Si sono raggiunti valori piuttosto soddisfacenti: il carico uniassiale applicato era pari a 2000 kg/min e il test è stato considerato concluso quando il carico applicato ha raggiunto la terza parte del carico massimo ammissibile. Per un provino non rinforzato durante il test si sono ottenuti valori pari a 3.765,57 daN, mentre per il provino rinforzato si è ottenuto un valore di 6.577,94 daN (75). Da questi test si è quindi potuto constatare come la juta abbia potuto migliorare le caratteristiche di compressione di un 40% circa rispetto ad un muro normale in adobe, avendo una buona adesione grazie alla malta composta da terra e gesso. Si può quindi affermare che gli studi condotti dall'UNIFI permettono una maggiore duttilità del sistema strutturale: andando a sopperire alle mancanze che la struttura in terra cruda ha nei confronti degli sforzi di tensione, dove invece, interviene la juta con le sue modeste caratteristiche plastiche. Tale metodo di irrigidimento è molto efficace nei confronti dei cedimenti di flessione orizzontale, ribaltamento sia totale che dei vertici.

³⁰ Briccoli Bati, S., Fagone, M., Loccarini, F., Ranocchiani, G. (2013) 'Jute fabric to improve the mechanical proprieties of rammed earth constructions'.

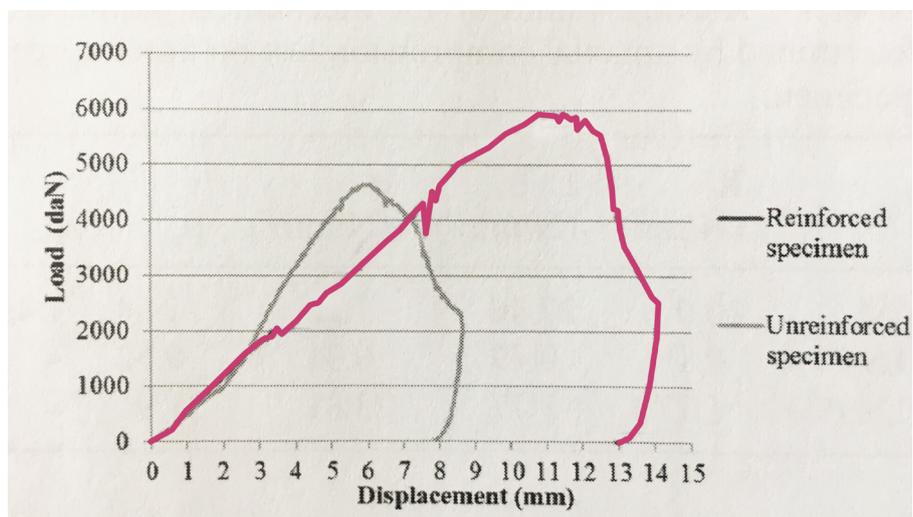


73 ▲ Sovrapposizione degli adobe alla maglia di juta.

Immagine di *Earthen Architecture: Past, Present and Future* (2015), p. 60.

74 ▼ Diagramma del carico di spostamento.

Immagine di *Earthen Architecture: Past, Present and Future* (2015), p. 60.



3.2.6 Rinforzi ligni angolari

Nella regione di Norte Chico, nelle Ande cilene il 40% delle costruzioni risulta essere in terra cruda; è molto comune che queste abitazioni abbiano dei rinforzi lignei per aumentare la resistenza sismica della struttura, visti i frequenti terremoti (la zona si trova tra la placca nordamericana e la placca di Nazca). In questo sito si possono quindi trovare edifici in adobe con rinforzi strutturali lignei in corrispondenza degli angoli o dei muri perpendicolari³¹. Grazie alle sue proprietà elastiche, quali: la flessibilità, la leggerezza e la sua grande deformabilità, prima di raggiungere il suo punto di rottura il legno offre un'ottima resistenza contro gli sforzi orizzontali dovuti principalmente al sisma, nonché un'eccellente dissipazione della stessa energia accumulata durante la scossa (*Dipasquale & Mecca, 2015*).

Questi rinforzi angolari vengono quindi disposti in corrispondenza degli incroci a "L" o a "T" dei muri e consistono nella sovrapposizione dei travetti - generalmente i travetti sono disposti parallelamente, in coppia (75) oppure nell'aggiunta di un terzo

elemento ligneo, sempre una trave, in posizione diagonale per donare una rigidità maggiore alla struttura (76). Infatti come viene sottolineato nella lettura relativa ai sistemi in Costa Rica²⁹ questo rinforzo accresce la resistenza contro gli sforzi orizzontali e contro gli sforzi di rotazione del muro favorendone l'integrità strutturale.

Come ci viene spiegato anche in un altro articolo³², quando si effettua questo tipo di intervento negli angoli della struttura, si è soliti riproporla almeno due volte - una ad una altezza intermedia ed una come coronamento nella catena superiore - su tutta l'altezza del muro. Vengono quindi disposti questi rinforzi più volte negli angoli dell'edificio per far in modo che la rigidità dell'intera struttura aumenti e il rischio di collasso diminuisca ulteriormente.

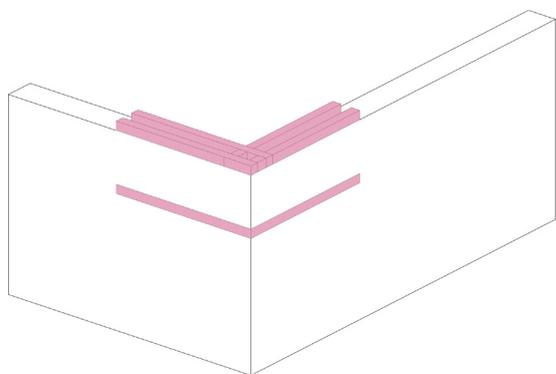
Sempre in Norte Chico è spesso comune disporre dei rinforzi dove viene a mancare la continuità strutturale; e quindi al di sopra delle aperture, in questo caso spesso il suddetto rinforzo sostituisce il classico archi-

³¹ Rivera Vidal, A. (2017) *The Chilean adobe as a seismic vernacular technology, the study of "Norte Chico" area*.

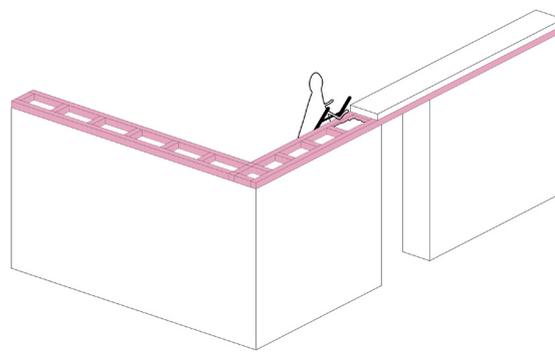
³² Michiels, T., (2014) *'Seismic retrofitting techniques for historic adobe buildings'*.

trave. Questa tipologia di architrave viene chiamata localmente *escalerillas*: poiché è composta da due travi parallele congiunte da altre ortogonali, ricordando in pianta una scala posta orizzontalmente (da qui la derivazione del nome); le travi hanno un'altezza pari a quella dei blocchi in adobe (77).

Per entrambi i sopracitati metodi di rinforzo ligneo essi vengono riempiti nelle parti vuote con della malta di terra utilizzata per la realizzazione degli adobe. Le sopracitate tecniche utilizzate nel territorio cileno si sono rivelate negli anni di estrema necessità per le abitazioni locali, le quali grazie a questi metodi di irrigidimento strutturale nei punti critici della struttura – soprattutto nei confronti dei cedimenti per ribaltamento totale o parziale – hanno permesso alle strutture di superare indenni terremoti superiori alla magnitudo 8 nella scala Richter.

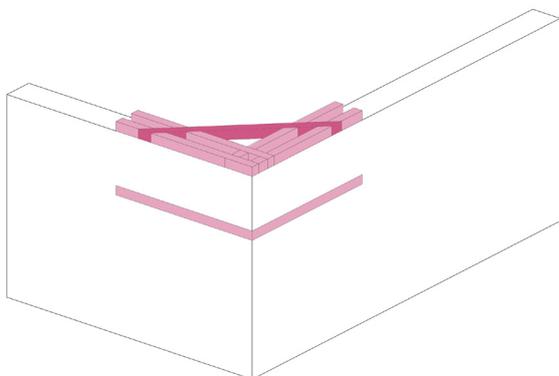


75 ▲ Schema dei rinforzi angolari lignei.
 Rielaborazione grafica di *Restauracion de arquitectura de tierra en zonas sismicas, el caso de Costa Rica*, Tesi di Laurea (2013), p. 133.



77 ▲ Schema della escalerillas.
 Rielaborazione grafica di *Restauracion de arquitectura de tierra en zonas sismicas, el caso de Costa Rica*, Tesi di Laurea (2013), p. 132.

76 ▼ Schema dei rinforzi angolari lignei.
 Rielaborazione grafica di *Restauracion de arquitectura de tierra en zonas sismicas, el caso de Costa Rica*, Tesi di Laurea (2013), p. 133.



3.2.7 Rinforzo angolare con geomaglia

Come presentato nell'articolo del Dipartimento di ingegneria Civile ed Edile dell'Università di Auckland³³ è possibile rinforzare l'intera struttura in terra cruda mediante una geomaglia orizzontale in corrispondenza degli angoli coadiuvata da un tondino di acciaio in posizione verticale. Il seguente articolo ripropone delle norme per la costruzione di edifici in terra cruda in ambiente con rischio sismico; la norma a cui si fa riferimento proviene infatti dalla Nuova Zelanda ed è la *NZS 4299:1998*³⁴. Esistono altresì degli schemi che ci permettono di capire la quantità e la capacità di resistenza dei rinforzi orizzontali che si andranno a disporre nella nostra architettura (78,79). La proposta riportata da questa norma per edifici con spessore del muro compreso tra i 280 e i 350 mm³⁵ è quella di inserire un tondino d'acciaio galvanizzato in posizione verticale, in corrispondenza degli incontri dei muri, che siano a "T" o a "L", e unirlo ad un secon-

do tondino verticale in corrispondenza delle aperture mediante l'utilizzo della geomaglia posta in posizione orizzontale (80,81).

Questo perché il muro presenta la maggior parte delle criticità in corrispondenza di angoli e aperture soprattutto durante gli sforzi di rotazione. Per i tondini verticali è consigliabile che essi vengano disposti dentro dei tubi in pvc, i quali possono garantire una sicurezza migliore contro la corrosione degli elementi di ferro. La maglia orizzontale in polipropilene con apertura compresa tra i 25 e 50 mm e con una resistenza di 40 kN/m, viene tagliata in strisce da 200 mm e collegata al tondino verticale ogni 450 mm, annegandola nella malta tra i mattoni in terra cruda.

Come altre alternative in sostituzione alla geomaglia, la normativa neozelandese prevede:

- l'impiego di cavi di acciaio dal diametro di 5.3 mm collegati ortogonalmente con dei cavi della stessa dimensione e dalla lunghezza pari a 10 cm; detti rinforzi orizzontali saranno annegati nella malta e ripetuti ogni 450 mm.

³³ Morris, H., Worth, M. (2011) *'The history of New Zealand housing and the performance of different styles in the 2011 Christchurch earthquakes'*.

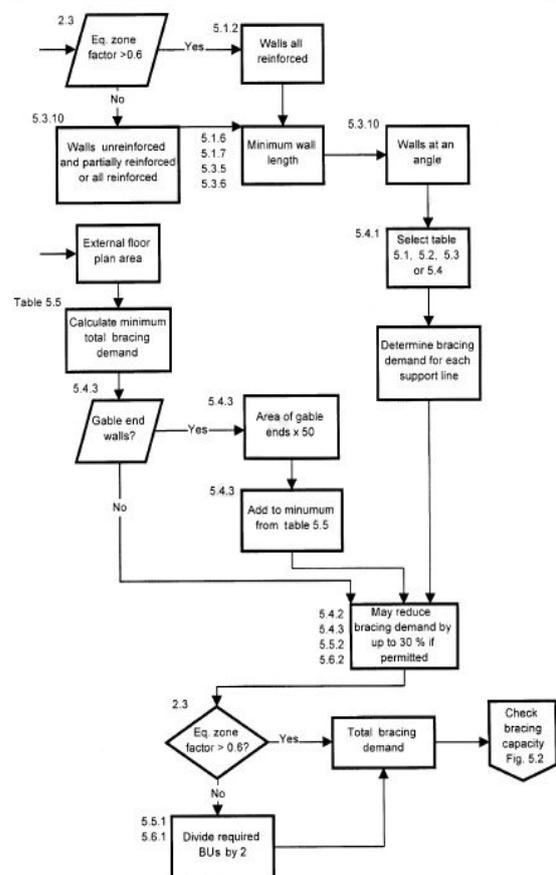
³⁴ Normativa NZS 4299:1998 (1998). Disponibile al seguente link: http://www.eastue.org/project/linea-adobe/norme/NZD4299-1998-Earth_Buildings_Not_Requiring_Specific_Design.pdf

³⁵ NZS 4299:1998 p.58-59.

- l'impiego di tondini di acciaio collegati in maniera ortogonale tra loro e posti ogni 900 mm di altezza del muro.

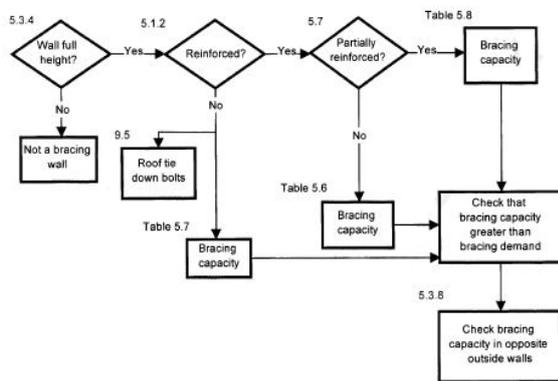
- oppure l'utilizzo di colonne in cemento per un irrigidimento strutturale più massivo (come già detto precedentemente questa opzione dà dei risvolti negativi per ciò che riguarda la compatibilità strutturale).

Durante il terremoto di Darfield avvenuto nel 2010 in Nuova Zelanda, si è raggiunta un'accelerazione orizzontale di 0.8 g e una magnitudo di 7.1 gradi sulla scala Richter. Le case in terra cruda non rinforzate purtroppo non sono riuscite a sopportare gli sforzi del terremoto. Mentre, le abitazioni rinforzate con il metodo sopraccitato della geomaglia e costruiti seguendo le regole dettate dalla norma neozelandese, hanno potuto sopportare egregiamente gli sforzi del sisma riportando solamente alcune crepe minori e un leggero spostamento degli architravi delle finestre. Questa tipologia di irrigidimento, quindi, seppur invasiva, permette un resistenza a tutti i tipi di cedimento strutturale.



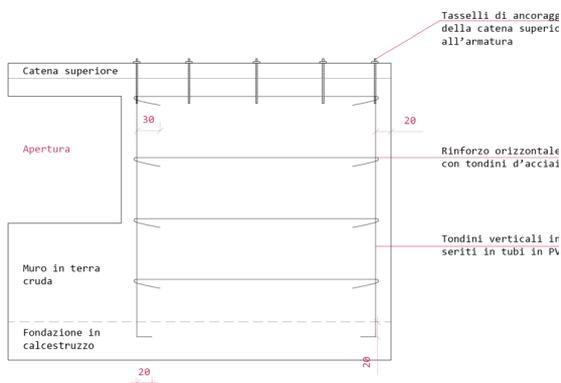
78 ▲ Diagramma per la determinazione della quantità di rinforzi orizzontali.

Immagine di NZS4299: 1998, Normativa Neozelandese (1998), p. 50.

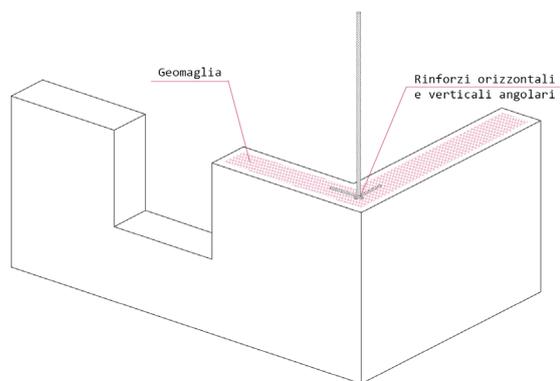


79 ▲ Diagramma per la determinazione della capacità dei rinforzi orizzontali.
Immagine di *NZS4299: 1998*, Normativa Neozelandese (1998), p. 51.

80 ▼ Schema di posizionamento dei rinforzi orizzontali.
Rielaborazione grafica di *NZS4299: 1998*, Normativa Neozelandese (1998), p. 57.



81 ▼ Schema di posizionamento dei rinforzi orizzontali.
Rielaborazione grafica di *NZS4299: 1998*, Normativa Neozelandese (1998), p. 59.



4

metodi di calcolo sismico

4.1 Cenni sui terremoti

4.1.1 Perché avviene un sisma?

4.1.2 Dove e quando?

4.1.3 Magnitudo e intensità

4.1.4 Scosse sismiche

4.1.5 Movimento del terreno

4.1.6 Natura delle forze sismiche

4.2 Fattori negativi

4.2.1 Peso proprio dell'edificio

4.2.2 Periodo di vibrazione

4.2.3 Smorzamento del materiale

4.2.4 Spettro di risposta

4.2.5 Duttilità

4.2.6 Forze agenti

4.3 Caso Ixcamilpa

4.3.1 Ribaltamento composto di parete

4.3.2 Flessione orizzontale di parete.

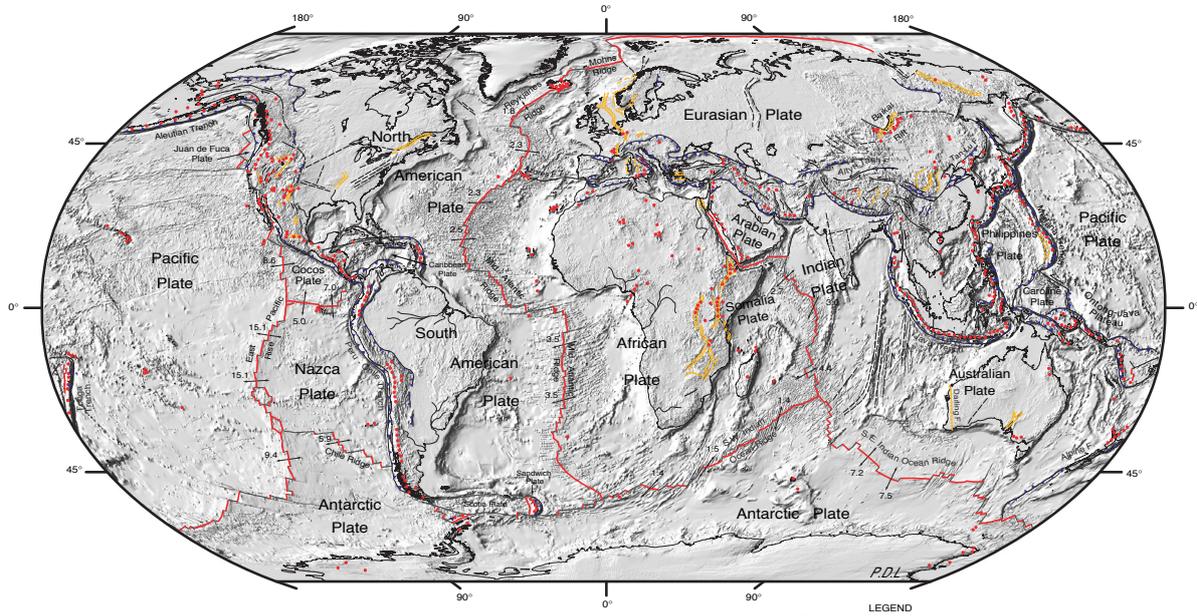
4.1 Cenni sui terremoti

4.1.1 Perché avviene un sisma?

Se prendiamo come esempio il raggio della terra, che è pari a 6400 km, la crosta terrestre è incredibilmente sottile; la profondità media è pari a 35 km, la quale diventa ancora più sottile negli abissi oceanici con soli 7 km. Bisogna quindi immaginare le placche tettoniche come dei frammenti di un guscio d'uovo che galleggiano sopra ad un liquido, in costante e impercettibile movimento: basti pensare che durante un anno si muovono di 50 mm circa (82), più o meno quanto crescerebbero le unghie delle nostre dita. In alcuni casi le placche tettoniche scivolano sopra ad altre reciprocamente; nel caso delle placche oceaniche invece, esse spingono contro le placche continentali, le quali essendo più spesse delle prime, ne causano il piegamento, anche conosciuto come *subduzione*. Vista la rugosità della superficie delle placche tettoniche, combinate con le enormi pressioni in gioco, vengono generati forti scivolamenti che hanno come risultato forze di frizione capaci di bloccare le superfici a contatto con esse. La componente rocciosa della crosta terrestre è in grado di assorbire più e più volte gli sforzi di compressione generati da questi scivola-

menti delle placche fino ad un *punto di rottura*. Durante questa *rottura* tutta l'energia accumulata dalla massa rocciosa viene liberata in un movimento violentissimo: *il terremoto*.

Banalmente il processo meccanico di come avviene un terremoto può essere comparato a quando si schioccano le dita della mano. Se premiamo le dita generiamo una frizione tra esse. Con i singoli muscoli delle dita possiamo imporre una forza lieve, la pressione risulterà quindi bassa e le dita non schioccheranno affatto. Quando la frizione che si crea sarà abbastanza potente il dito scivolerà sul pollice andando ad urtare il palmo della mano, la tensione repressa invece si trasformerà in energia cinetica. Questo processo porta alla rottura della superficie terrestre che viene chiamata *faglia*. In alcuni terremoti la *faglia* può apparire sullo strato più superficiale della crosta terrestre e, di conseguenza, si può vedere. Generalmente la lunghezza della *faglia* è relazionata alla magnitudo del terremoto; un terremoto di magnitudo 6 può generare una faglia dalla lunghezza compresa tra i 10 e i 15 km, men-



DIGITAL TECTONIC ACTIVITY MAP OF THE EARTH
 Tectonism and Volcanism of the Last One Million Years
DTAM - 1

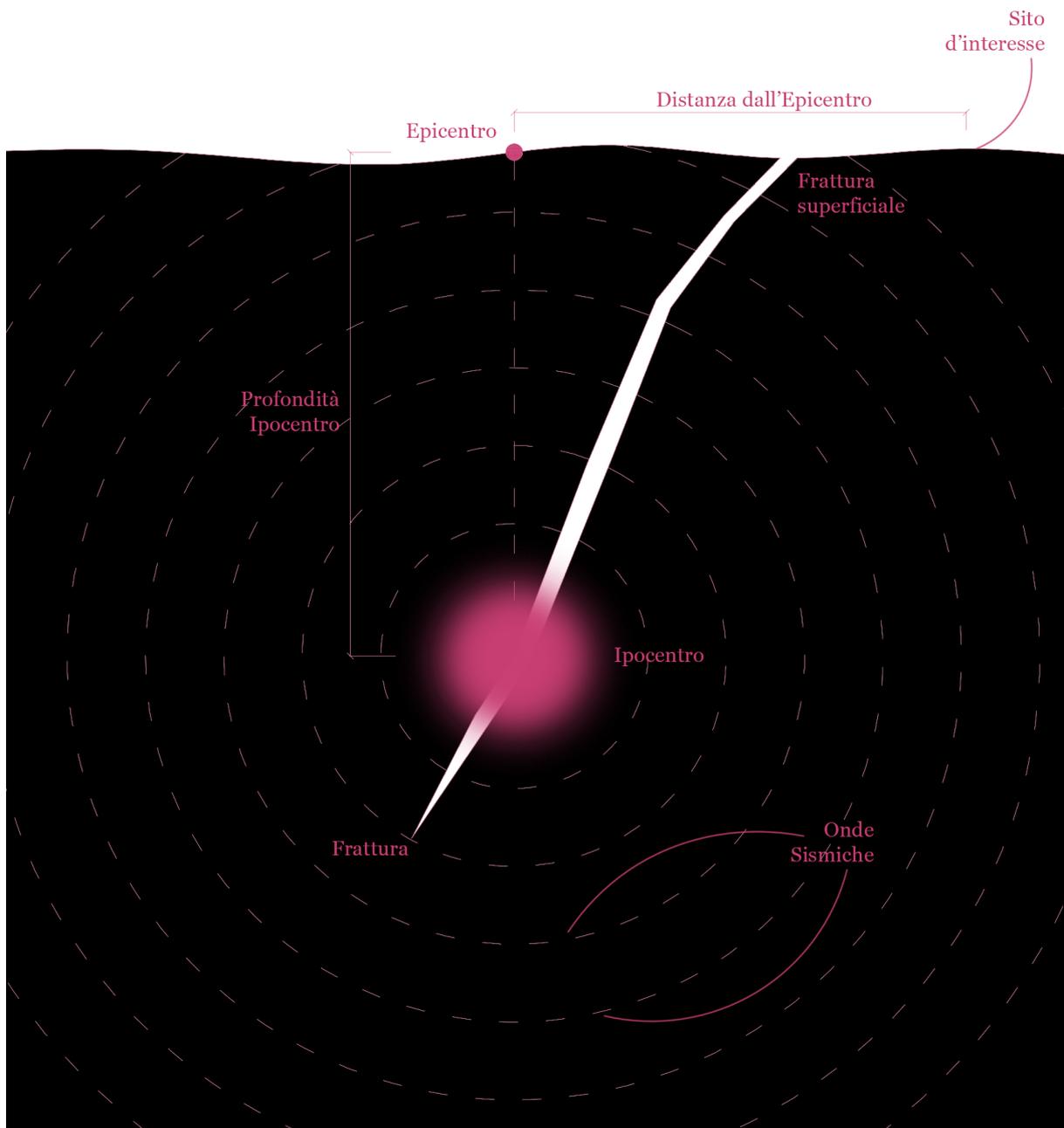
NASA/Goddard Space Flight Center
 Greenbelt, Maryland 20771

Robinson Projection
 October 2002

- LEGEND**
- Actively-spreading ridges and transform faults
 - Total spreading rate, cm/year
 - Major active fault or fault zone; dashed where nature, location, or activity uncertain
 - Normal fault or rift; hachures on downthrown side
 - Reverse fault (overthrust, subduction zones); generalized; bars on upthrown side
 - Volcanic centers active within the last one million years; generalized. Minor basaltic centers and seamounts omitted.

G221.001

82 ▲ Attività delle placche tettoniche globali. Immagine disponibile sul sito ufficiale della NASA.



83▲ Schema delle attività base di un terremoto. Rielaborazione grafica di Seismic Design for Architect(2008), p. 21.

tre con un evento di magnitudo 8 può arrivare a misurare dai 100 ai 200 km. Le *faglie* si estendono per km anche in profondità e questo ne determina l'aumento dell'area totale di rottura.

Il punto da dove viene sprigionata l'energia è chiamato *ipocentro* e si trova al di sotto della superficie **(83)**, nella crosta terrestre. La sua proiezione sulla superficie terrestre viene denominata invece *epicentro* ed è il punto presente nell'area di rottura dove si sprigiona la maggior parte di energia. La distanza tra epicentro e ipocentro determina con quanta forza il terremoto impatterà sulla superficie terrestre, e quindi quanti danni produrrà. Un ipocentro profondo centinaia di metri non produrrà grandi scosse sismiche, ma agirà su un'area epicentrica più ampia. Mentre un ipocentro più superficiale sarà più devastante ma su un'area più concentrata.

4.1.2 Dove e quando?

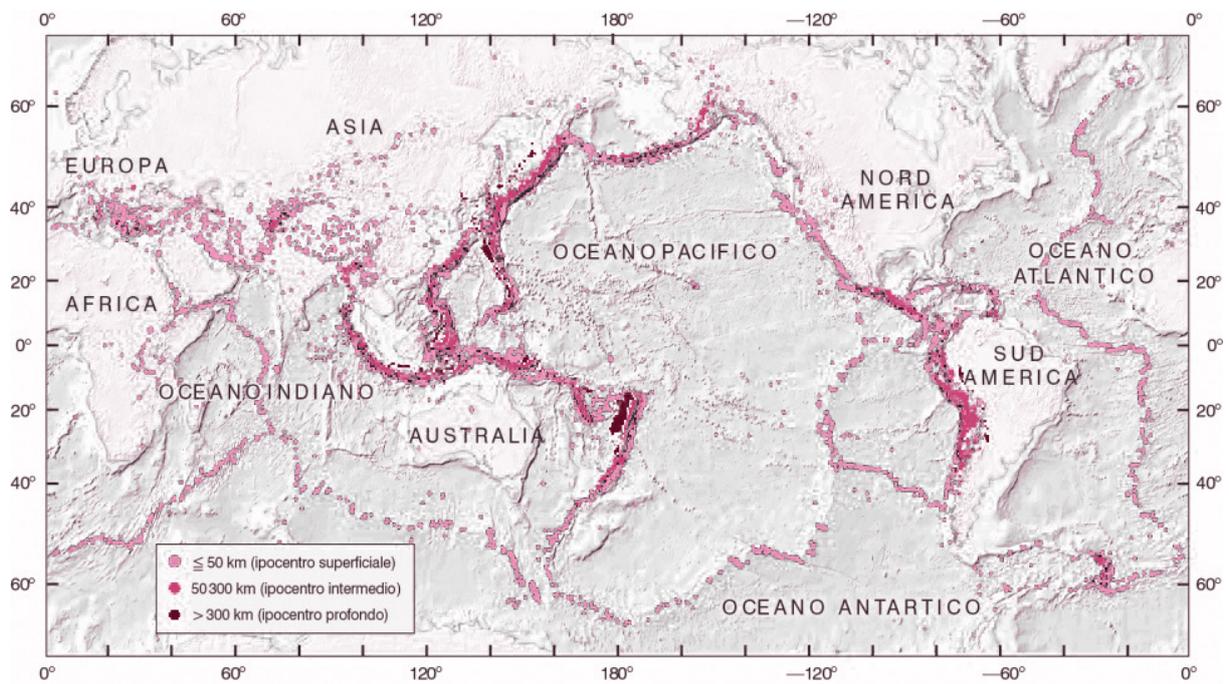
Il 70% dei terremoti registrati annualmente avvengono attorno al perimetro della placca Pacifica, mentre il 20% avviene nella parte Sud della placca Euroasiatica, la quale passa dalla catena dell'Himalaya fino a raggiungere il Mediterraneo (84). Il restante 10% non colpisce in zone ben determinate delle placche tettoniche ma piuttosto casualmente, alcuni di questi sismi sono veramente distruttivi. Anche se non è possibile predire i terremoti oggi giorno si può fare affidamento su dati statistici elaborati da studiosi del settore i quali sono sempre più accurati, basando la loro affidabilità su dati storici e calcoli probabilistici.

Gli ingegneri strutturisti solitamente utilizzano questi dati probabilistici per valutare l'accelerazione al suolo dei terremoti, assieme al periodo di ritorno; questi due dati risultano di fondamentale importanza per i progetti futuri.

La probabilità p che un terremoto abbia un periodo di ritorno T e avvenga nella vita L di un edificio, viene espressa quindi, dall'equazione di Poisson.

$$p = 1 - e^{-L/T}$$

Il tempo di ritorno di un terremoto viene approssimativamente calcolato come 500 anni mentre la vita nominale di un edificio è attorno ai 50 anni. Dall'equazione se ne deduce che la probabilità che un futuro evento sismico ecceda quello precedentemente avvenuto durante la vita dell'edificio è compresa tra lo 0,1 e il 10 %. Ovviamente per edifici adibiti ad usi particolari la T aumenta fino a 1000 anni; è il caso di ospedali o edifici di prima necessità per la popolazione, che non possono crollare durante un sisma perché di fondamentale importanza.



84 ▲ **Mapa della distribuzione dei terremoti mondiali.** *Immagine disponibile sul sito ufficiale di G.M.P.E..*

4.1.3 Magnitudo e intensità

Grazie ai *sismografi* si possono determinare posizione, epicentro e magnitudo di ogni evento. La scala logaritmica con i quali i *sismografi* registrano gli effetti del terremoto è la scala di Richter (**T6**). Ogni aumento di punteggio sulla scala di Richter corrisponde ad un incremento dell'energia pari a 30 volte maggiore; mentre due punti in più sulla scala corrisponderebbero complessivamente ad un'energia sprigionata pari a 900 volte maggiore. Ma non è così semplice la questione della distruttività di un terremoto: basti pensare che nel 1976 in Cina nella città di Tangshan è avvenuto l'evento più letale del ventesimo secolo, con 650.000 morti e una magnitudo di 7,7 sulla scala Richter. Mentre il terremoto più forte mai registrato è stato il Grande terremoto del Cile dove nel 1960 si registrò un sorprendente 9,5 sulla scala Richter con annesso il successivo Tsunami ed Eruzione del Vulcano Puyehue; nonostante ciò furono registrate meno vittime. Questo perché la potenza di un sisma dipende da molti fattori, primo fra tutti ovviamente se l'area in cui colpisce è densamente abitata: giungerà subito la notizia di un terremoto che ha colpito un'area con molte

persone creando ingenti danni piuttosto che un terremoto in un luogo poco abitato.

Inoltre la scala Richter non tiene in considerazione alcuni parametri molto importanti per valutare la potenza distruttiva di un terremoto: l'intensità, la distanza dell'area di impatto dall'epicentro e la composizione del suolo, che pregiudica in maniera elevata gli effetti di un sisma. Per esempio: un suolo più sabbioso aumenta la durata del sisma e l'intensità finale rispetto ad un terreno roccioso.

Per questo si sono sviluppate varie scale per valutare gli effetti di un sisma; la seconda per importanza è la scala di Mercalli (**T7**), la quale si basa principalmente sull'*intensità*. Questa è presentata con una semplice tabella dove a sinistra sono presenti i gradi della scala mentre sulla destra vengono descritti i danni provocati dall'evento, i quali sono stati registrati in base a interviste fatte a persone che hanno vissuto un terremoto di un grado simile assieme all'osservazione dei danni provocati.

MAGNITUDO	TNT EQUIVALENTE	ENERGIA
0	15 g	63 kJ
1	0,48 kg	2 MJ
1,5	2,7 kg	11 MJ
2	15 kg	63 MJ
2,5	85 kg	355 MJ
3	477 kg	2,0 GJ
3,5	2,7 t	11 GJ
4	15 t	63GJ
4,5	85 t	355 GJ
5	477 t	2,0 TJ
5,5	2.682 t	11 TJ
6	15.000 t	63 TJ
6,5	85.000 t	354 TJ
7	477.000 t	2,0 PJ
7,5	2,7 milioni di t	11 PJ
8	15 milioni di t	63 PJ
8,35	50,5 milioni di t	211 PJ
8,5	85 milioni di t	355 PJ
9	477 milioni di t	2 EJ
9,15	800 milioni di t	3,35 EJ
9,5	2,7 miliardi di t	11 EJ
10	15 miliardi di t	63 EJ
13	476.880 miliardi di t	2 YJ

T6 ▲ Tabella della scala Richter.

GRADO	SCOSSA	DESCRIZIONE
I	strumentale	avvertita solo dagli strumenti
II	debole	avvertito solo da poche persone sensibili in condizioni particolari
III	leggera	avvertito da poche persone
IV	moderata	avvertito da molte persone; tremiti di infissi e cristalli, oscillazione di oggetti sospesi
V	piuttosto forte	avvertito da molte persone anche addormentate, caduta di oggetti
VI	forte	qualche lesione agli edifici
VII	molto forte	caduta di comignoli; lesione agli edifici
VIII	distruttiva	rovina parziale di alcuni edifici; vittime isolate
IX	rovinosa	rovina totale di alcuni edifici, molte vittime umane, crepacci nel suolo
X	disastrosa	crollo di parecchi edifici, numerose vittime umane, crepacci evidenti nel terreno
XI	catastrofica	distruzione di agglomerati urbani, moltissime vittime, crepacci, frane, maremoto
XII	apocalittica	danneggiamento totale; distruzione di ogni manufatto; pochi superstiti, sconvolgimento del suolo, maremoto

T7 ▲ Tabella della scala Mercalli.

4.1.4 Scosse sismiche

Le scosse sismiche incominciano a propagarsi sulla superficie terrestre in maniera radiale partendo dalla *faglia* di rottura. La forma delle onde sismiche è più simile ad un'ellisse rispetto a un cerchio perfetto, quindi gli sforzi maggiori si propagheranno sul semiasse più lungo. Le scosse sismiche generano tre tipi di onde: le *onde P*, le *onde S* e le *onde di Superficie*.

Le *onde P* sono le onde *primarie* (85) e la loro oscillazione è la più veloce delle tre tipologie; agiscono nella parte inferiore della crosta terrestre dove è presente la parte rocciosa.

Le *onde S* o onde *secondarie* (85) sono quelle alle quali i progettisti devono rivolgere più attenzione poiché muovono le particelle del sottosuolo in corrispondenza dell'asse x e y. Si propagano dall'*ipocentro* con una velocità pari a 3 km/s.

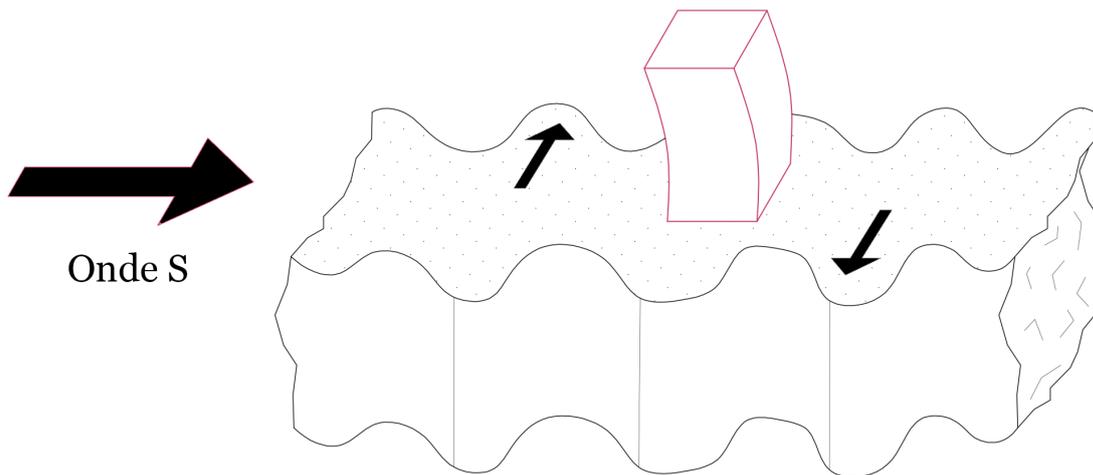
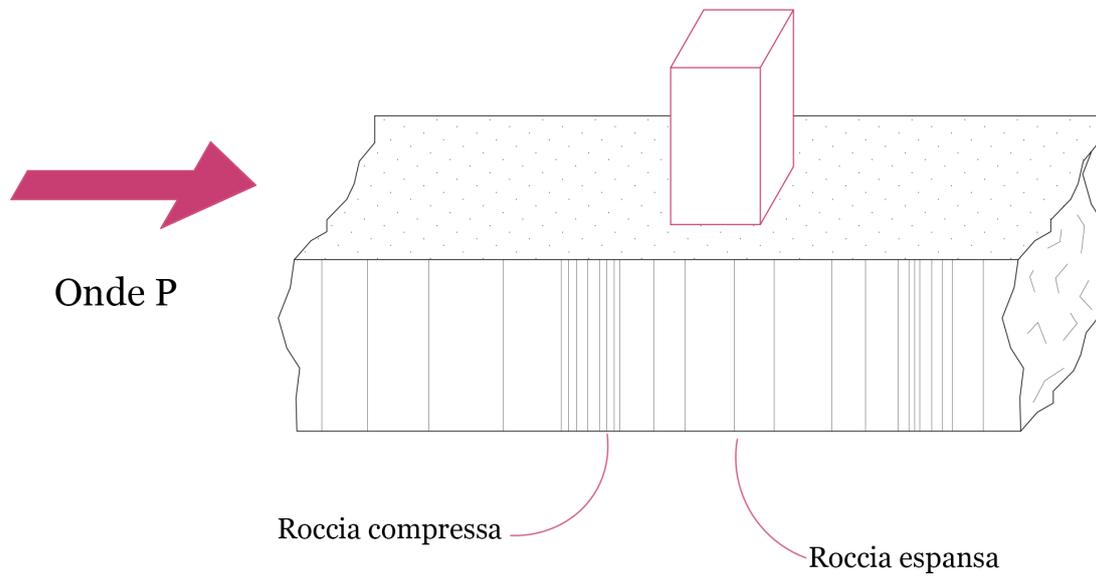
Le *onde superficiali*, come si capisce dal nome, producono i loro effetti nella parte più a contatto con la superficie terrestre. Queste onde si dividono in due sottocategorie che prendono il nome degli scienziati che

le hanno studiate:

- *onde Love*, sono quelle onde che lavorano sulla componente orizzontale della superficie;

- *onde Rayleigh*, sono quelle che oltre alla componente orizzontale ne aggiungono una verticale, nella quale il moto oscillatorio è simile a quello delle onde marine.

Tutte queste tre tipologie di onde sismiche sono molto importanti perché agiscono tutte sulla componente orizzontale che è quella più pericolosa per gli edifici paragonata a quella verticale. Questo perché l'effetto oscillatorio agisce sulle fondamenta degli edifici, e l'energia sprigionata dal sisma viene amplificata; inoltre le onde orizzontali trasmettono uno sforzo di torsione rotatoria che agisce sempre in corrispondenza delle fondazioni.



85▲ Movimento del terreno dovuto alle onde P e S. Rielaborazione grafica di Seismic Design for Architect(2008), p. 26.

4.1.5 Movimento del terreno

Le caratteristiche più importanti per la progettazione di edifici sismoresistenti sono: il valore di picco di *accelerazione al suolo*, la *durata della scossa* più forte e la *frequenza di oscillazione* del sisma.

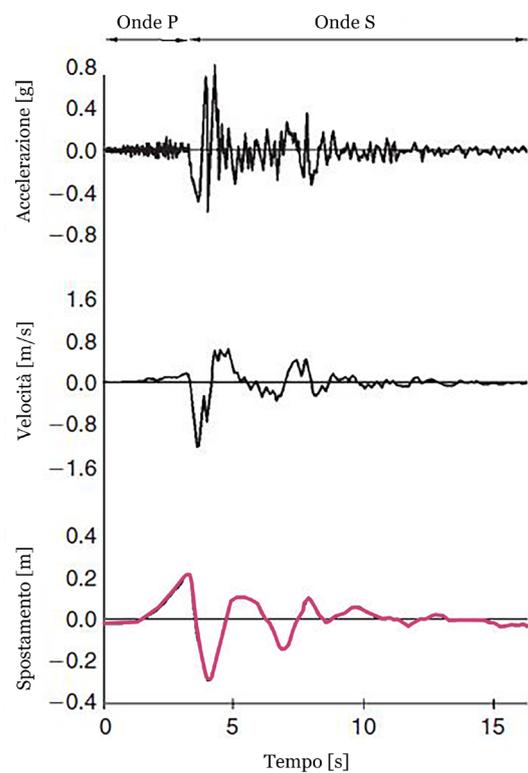
L'accelerazione al suolo dei terremoti è registrata, ancora una volta, dai sismografi i quali registrano il rapido cambiamento di accelerazione o di velocità durante tutta la durata del terremoto. Dal grafico in (86) si può notare facilmente il movimento del terreno, si ha uno spostamento di 0,5 m da una direzione ad un'altra nel giro di 1,5 secondi. I valori registrati di accelerazione al suolo normalizzati variano da 0,2 a 1 g, dove g è l'accelerazione dovuta alla gravità. Per fare un esempio, ad 1 g il comportamento oscillatorio dell'edificio potrebbe essere rappresentato in uno schema statico dove l'intero edificio diventa una mensola (87); non tutti gli edifici possono resistere ad una sollecitazione di tale entità.

La durata dell'evento sismico può anche influire sulla quantità di danni a cui un edificio può resistere. Questo perché l'edificio continua ad accumulare l'energia del sisma

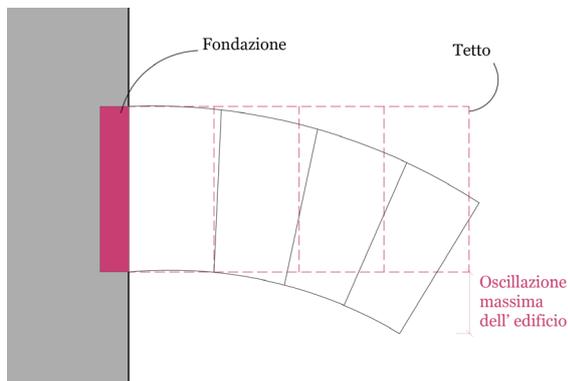
per un lungo periodo senza poterla dissipare; in questa maniera i danni che verranno causati all'edificio saranno molto più consistenti. Nelle strutture in cemento si crepano prima le travi e successivamente le colonne; questo porta ad un indebolimento della struttura ma anche ad un'ulteriore flessibilità della stessa, prima del collasso. La durata di un terremoto cresce con l'aumento della magnitudo: un sisma di magnitudo 6 ha una durata all'incirca di 12 secondi, mentre una magnitudo 8 può durare fino a 30 secondi. Se il tipo di suolo non è di tipo roccioso la durata del terremoto può anche raddoppiare.

La frequenza di oscillazione è influenzata significativamente dalle condizioni del sottosuolo. In un terreno roccioso per esempio l'energia sprigionata da un terremoto è compresa tra frequenze che variano da 1 a 6 cicli al secondo; le frequenze risultano essere più basse se si è in presenza di un suolo sabbioso e non roccioso. Nelle vicinanze di un lago o di un fiume ad esempio, la frequenza del sisma aumenterà vertiginosamente, causando così maggiori danni. È il caso di

Città del Messico, la quale risiede sopra ad un lago ormai bonificato da centinaia di anni. Il grande deposito di argilla umida durante il terremoto si comporta come se fosse gelatina andando ad aumentare le vibrazioni delle onde sismiche producendo uno sforzo fino a cinque volte maggiore.



87 ▼ Schema del comportamento di un edificio quando è sottoposto ad un accelerazione pari a 1 g. Rielaborazione grafica di Seismic Design for Architect(2008), p. 27.



86 ▲ Grafico dell'accelerazione, velocità e spostamento del sisma del 1994 a Symlar, California. Rielaborazione grafica di Seismic Design for Architect(2008), p. 27.

4.1.6 Natura delle forze sismiche

Le forze di un terremoto sono delle forze di inerzia, e sono generate quando la massa resiste all'accelerazione del terreno dovuta al sisma. Questo tipo di forza è riscontrabile quando per esempio viaggiamo su un bus o un tram; se ci sono dei bruschi cambi di velocità noi perdiamo l'equilibrio. Per contrastare lo sforzo dobbiamo utilizzare un maggior quantitativo di energia per non spostarci oppure cambiare posizione muovendoci.

Il *secondo principio della dinamica di Newton* è l'equazione principale per la progettazione di edifici sismoresistenti:

$$F=Ma$$

Dove M è la massa dell'oggetto determinata dividendo il peso per l'accelerazione gravitazionale, mentre a è l'accelerazione a cui è soggetto l'edificio.

Gli sforzi di inerzia agiscono all'interno della struttura dell'edificio; questo perché le scosse del sisma impattano sulle fondazioni le quali trasferiscono le oscillazioni

orizzontali a tutta la struttura. È giusto precisare che esiste una sostanziale differenza tra gli sforzi dovuti all'azione del vento e gli sforzi inerziali. Le azioni del vento agiscono esternamente all'edificio, ovvero sull'intera superficie di contatto, in questo caso le pareti esterne. Entrambe le forze che agiscono sulla struttura sono dinamiche, ma mentre quelle dovute ad un evento sismico durano per qualche secondo, la durata delle azioni dovute al vento si aggira attorno al minuto.

4.2 Fattori negativi

4.2.1 Peso proprio dell'edificio

L'elemento più importante che determina l'azione delle forze di inerzia in un edificio è il peso proprio dello stesso; più un oggetto è pesante e più le forze di inerzia avranno un livello di accelerazione maggiore. La soluzione migliore è quella di costruire con materiali il più leggeri possibile. Sfortunatamente nei paesi con disponibilità economiche ridotte o in via di sviluppo le tipologie di costruzione vertono sull'utilizzo di materiali con un peso specifico elevato: *adobe*, mattoni, pietra e cemento armato.

Gli architetti e gli ingegneri strutturisti dovrebbero cercare di sensibilizzare l'utilizzo di materiali più leggeri, sempre con un occhio di riguardo al lato economico e sostenibile.

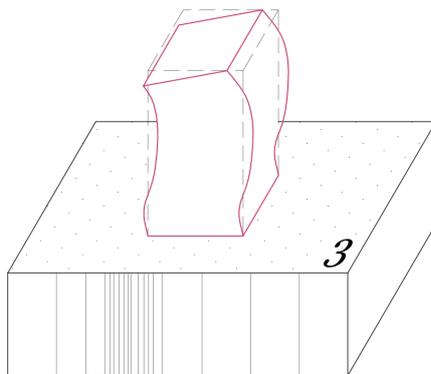
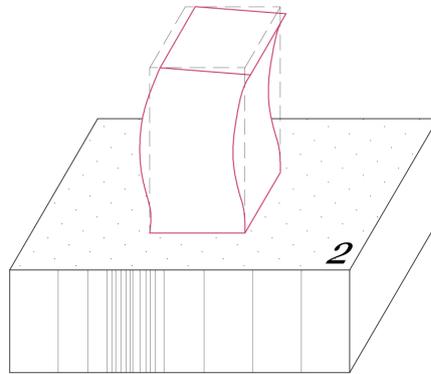
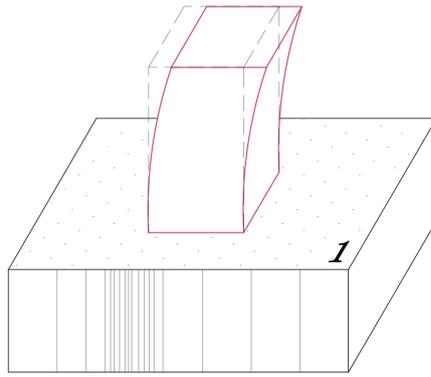
4.2.2 Periodo di vibrazione

Durante le scosse sismiche gli edifici oscillano con un periodo di vibrazione costante. Ogni edificio costruito ha un proprio periodo di vibrazione che viene misurato in secondi. Un edificio in base a come viene colpito dalle oscillazioni delle onde sismiche può muoversi in differente maniera: dei tre modi oscillatori presentati in figura (88), il primo è il più comune. Questo tipo di movimento dell'edificio avviene quando le onde sismiche colpiscono le fondazioni, le quali trasmettono le vibrazioni all'intera struttura portante, che a sua volta oscilla in maniera ripetitiva. Il periodo di vibrazione di un edificio dipende, quindi, da molteplici fattori:

- *l'altezza dell'edificio*, è la caratteristica che grava maggiormente; per conoscere approssimativamente il periodo di vibrazione è utile moltiplicare per 0,1 il numero di piani dell'edificio. Ad esempio, il periodo di vibrazione di un edificio di 10 piani è pari a un secondo.

- *il peso dell'edificio*, come già menzionato, più è pesante l'edificio più lungo sarà il periodo di vibrazione.

- *il tipo di struttura*, la quale permette di resistere meglio agli sforzi sismici; una struttura a telaio è più flessibile rispetto ad una struttura con muri portanti, ne consegue che il suo periodo di vibrazione sarà più elevato.



4.2.3 Smorzamento del materiale

Lo smorzamento dell'edificio è un altro fattore che influisce sulle caratteristiche dinamiche dell'edificio. Il grado di smorzamento di un edificio dipende dal materiale utilizzato, ma anche da altre caratteristiche tecnologiche della struttura. Le strutture in cemento armato posseggono uno smorzamento più elevato rispetto a strutture in acciaio ma minore rispetto ai valori raggiungibili da strutture in legno. Lo smorzamento dei materiali assorbe l'energia sprigionata dal sisma e riduce l'effetto di risonanza, questo è un effetto positivo per gli edifici che hanno un'altezza notevole, poiché l'effetto della risonanza può causare danni rilevanti.

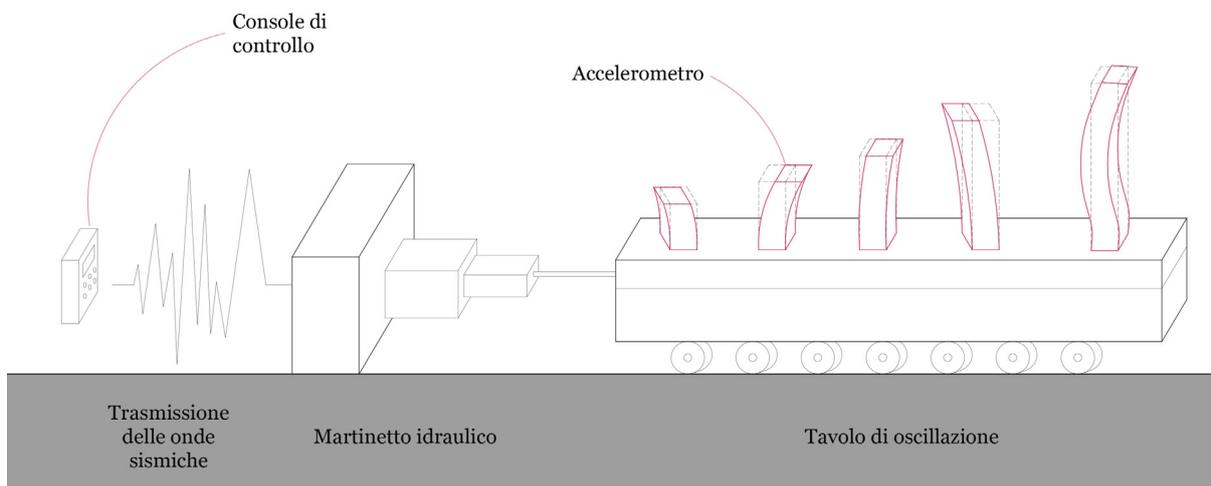
4.2.4 Spettro di risposta

Lo spettro di risposta è un metodo efficace per quantificare come il periodo di vibrazione e lo smorzamento rispondono alle scosse sismiche.

Questo metodo viene testato tramite un macchinario dove vengono costruiti dei modellini in scala dell'edificio; il modello viene fissato ad un tavolo che oscillerà con una determinata frequenza sull'asse trasversale, simulando appunto i movimenti di un sisma (89). Tramite gli accelerometri posti sull'estremità superiore del modellino sarà possibile analizzare l'accelerazione massima. Ovviamente il modello sarà costruito con lo stesso materiale dell'edificio in esame e quindi anche lo smorzamento sarà il medesimo. I risultati delle oscillazioni dovute verranno visualizzate su due grafici (90.a, 90.b).

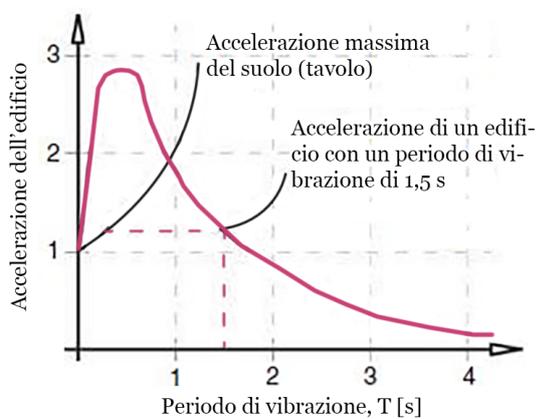
Nel secondo è indicata per esempio l'accelerazione al suolo di un edificio con un periodo naturale di 0 secondi, pari ad una unità. Ma se un edificio ha un periodo di vibrazione più elevato questo graverà sull'intera struttura, andando ad amplificare gli effetti dell'oscillazione. Ad esempio,

durante i primi istanti del sisma l'edificio presenta la sua massima accelerazione che raggiunge quasi il fattore 3,0, mentre da 0,7 secondi incomincia a decrescere fino a raggiungere il fattore pari a 1,0 (fattore che è equivalente all'intensità dell'accelerazione al suolo) in corrispondenza di 1,7 secondi. Infine l'accelerazione decrescerà fino ai 4 secondi.

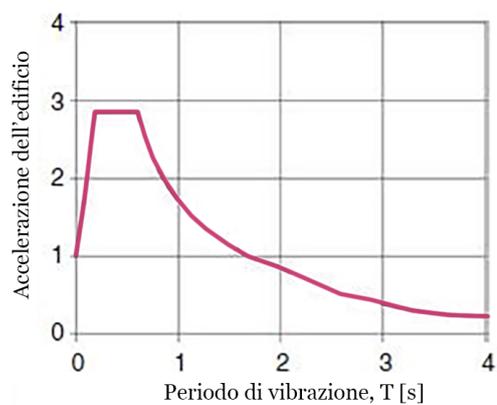


89 ▲ Tavolo di vibrazione. Rielaborazione grafica di Seismic Design for Architect(2008), p. 36.

90 ▼ Grafico dello spettro di risposta (a) e del corrispettivo carico (b). Rielaborazione grafica di Seismic Design for Architect(2008), p. 37.



(a) Spettro di risposta sismica



(b) Esempio del carico dovuto allo spettro di risposta per un suolo di tipo normale

4.2.5 Duttività

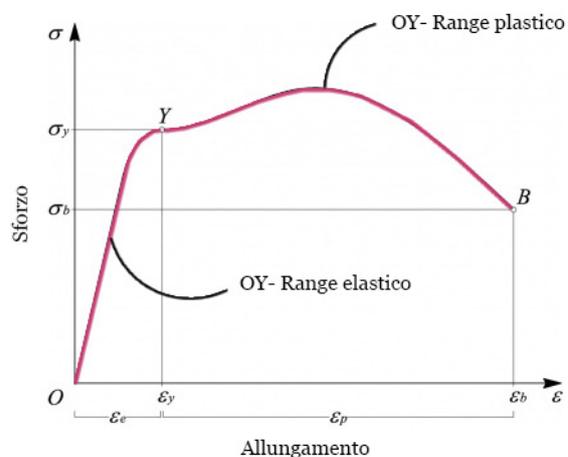
La duttilità di una struttura ricopre un ruolo molto importante durante l'avvenimento di un sisma. In base al grado di duttilità dell'edificio, l'azione delle forze sismiche può essere ridotta sino ad $1/6$ (Charleson, A., 2008).

Un materiale duttile è in grado di raggiungere il suo limite elastico e dopodichè deformarsi plasticamente. Il materiale continua, pertanto, la sua deformazione sino al raggiungimento del massimo allungamento, corrispondente alla definitiva rottura (91). Questo tipo di comportamento è normalmente assimilabile all'acciaio.

Ma l'utilizzo di un materiale duttile, non determina la realizzazione di una struttura con un comportamento duttile. Infatti le parti più critiche di un'architettura sono appunto le connessioni orizzontali e verticali; queste dovranno essere progettate dettagliatamente per fare in modo sì che reagiscano in maniera duttile agli sforzi sismici (Milano, L., Mannella, A., Morisi, C., Martinelli, A., 2009). Le architetture non duttili devono essere progettate per sopportare un limite al collasso pari a sei volte maggiore rispetto

al limite di collasso di un edificio duttile.

Questo poiché un materiale non duttile non è in grado di dissipare l'energia accumulata durante la scossa tellurica sottoforma di deformazione plastica.



91 ▲ Grafico dell'allungamento dell'acciaio.

4.2.6 Forze agenti

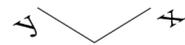
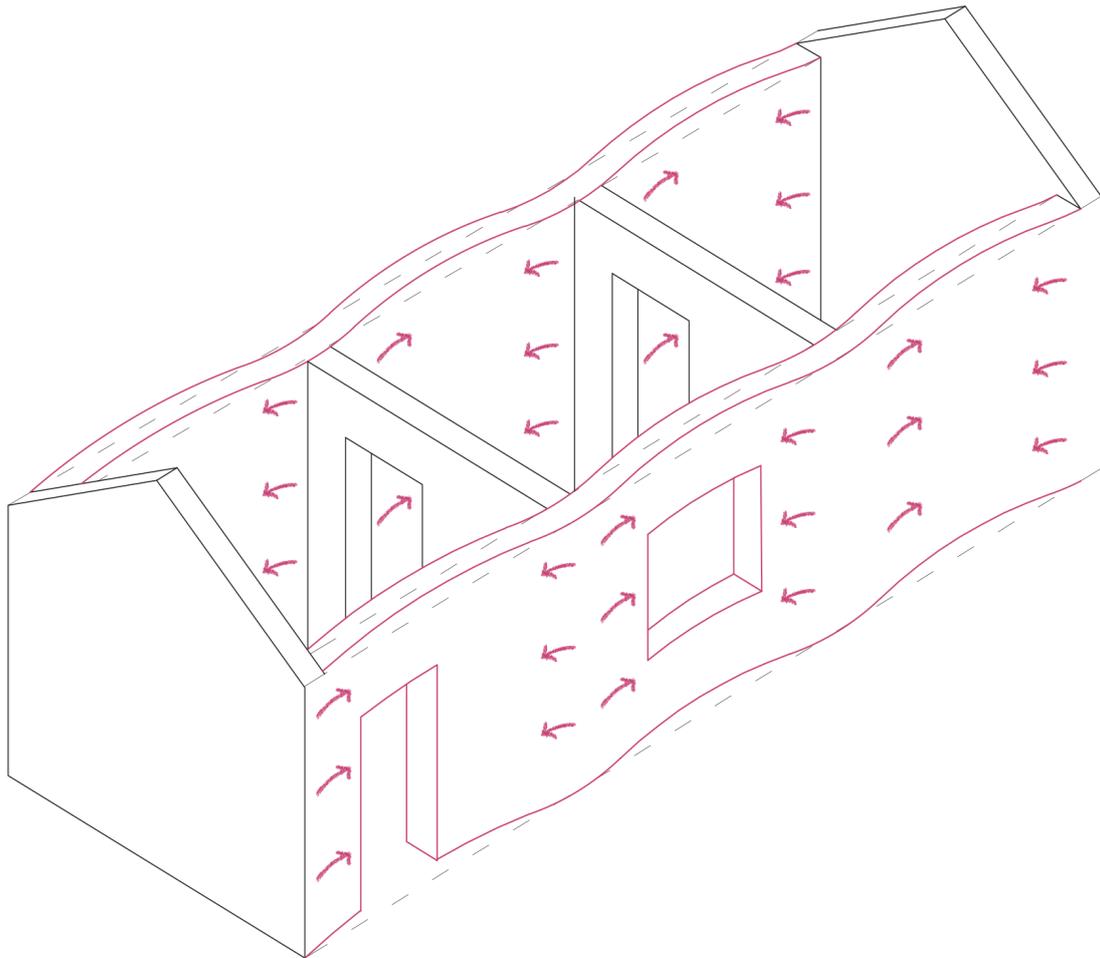
La determinazione delle forze, o carichi, agenti sulla struttura è un ricorso grafico che si attua per la valutazione delle azioni strutturali. Non sempre la rappresentazione grafica ci dà una visione completa di tutti i carichi che agiscono sull'edificio, ma è molto utile per comprendere alcuni dei comportamenti strutturali.

Il metodo grafico (92) permette di capire come la struttura reagisca agli sforzi sismici, essa dovrà essere in grado di resistere alle forze sismiche agenti e in aggiunta di dissipare l'energia accumulata sugli altri elementi strutturali. Nello schema si può notare come l'edificio che presenta un singolo piano con due tramezzature interne subisca gli sforzi del sisma lungo l'asse y (93).

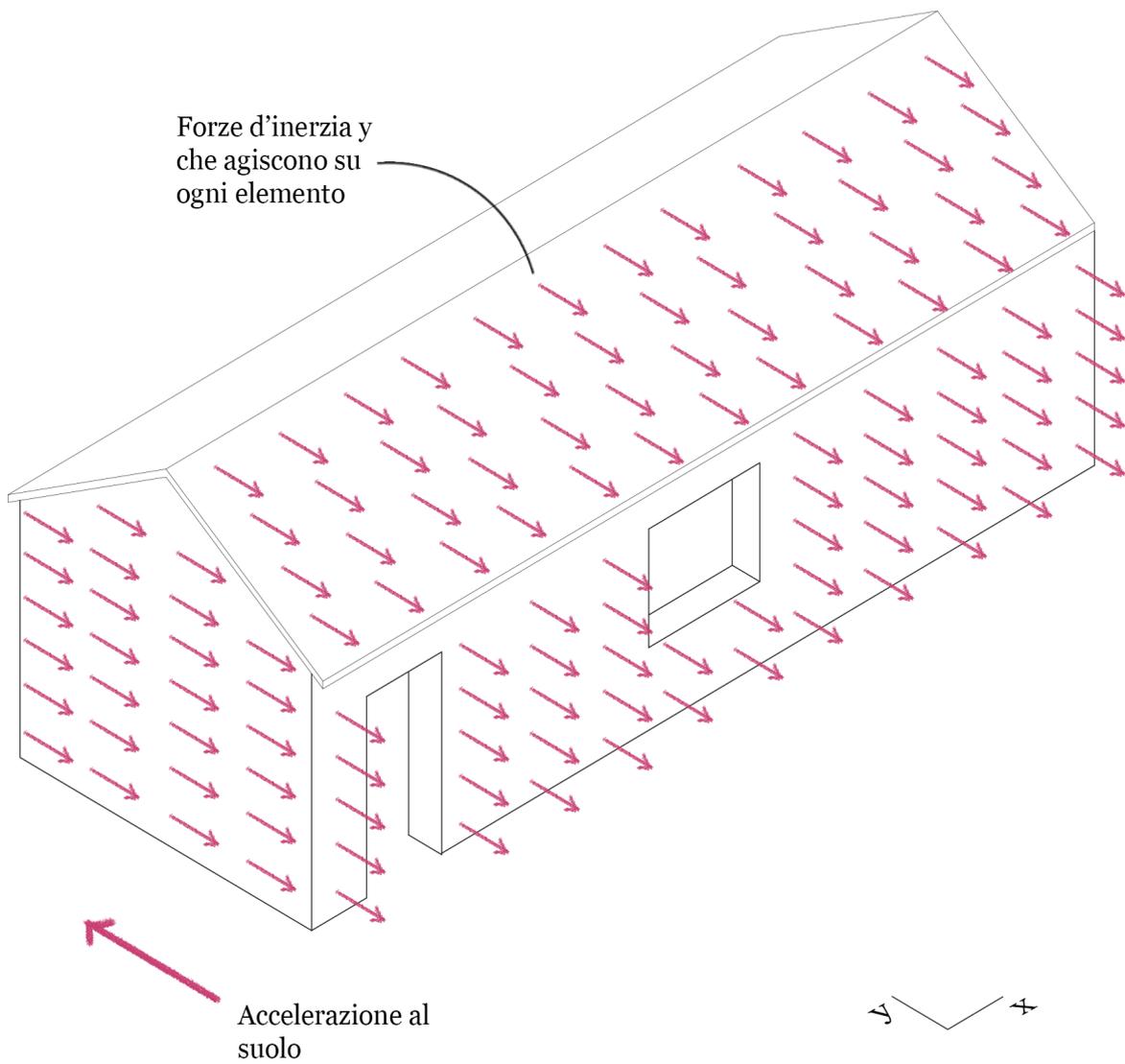
Ma le pareti parallele all'asse x da sole, non hanno resistenza sufficiente ad assorbire l'energia sprigionata dal sisma; non essendo sufficientemente rigide presentano un comportamento a mensola. Con l'inserimento di una catena superiore, la trasmissione delle forze d'inerzia cambia: la parete è ora in grado di dissipare metà dell'energia accumulata nelle fondazioni e l'altra metà

alla copertura. La catena superiore fungerà quindi da irrigidimento per l'intera struttura: parte delle forze di inerzia dovute al sisma verrà trasferita alle pareti sull'asse y (94).

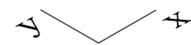
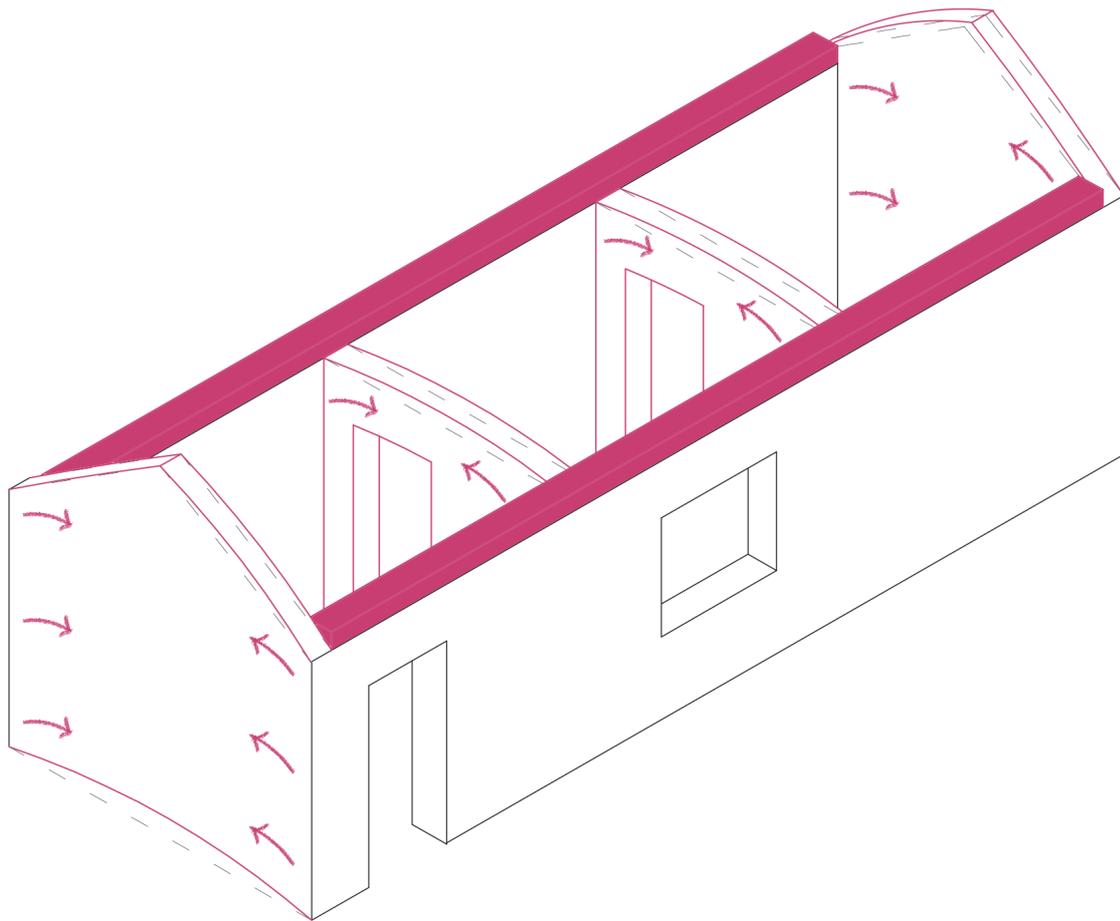
Durante un evento sismico avvengono quindi più sforzi contemporaneamente i quali assorbono e trasferiscono a loro volta energia; i muri resistono ai momenti di rotazione sopportando gli sforzi di taglio.



92▲ Deformazione della struttura sotto gli sforzi sismici. Rielaborazione grafica di *Seismic Design for Architect*(2008), p. 45.



93 ▲ **Forze di reazione sismica agenti nella struttura.** *Rielaborazione grafica di Seismic Design for Architect(2008), p. 44.*



94 ▲ **Trasmissione degli sforzi sismiche grazie alla catena superiore.** *Rielaborazione grafica di Seismic Design for Architect(2008), p. 46.*

4.3 Caso Ixcamilpa

Come detto nei capitoli precedenti l'edificio costruito durante il workshop non ha subito trattamenti antisismici tali da garantire una stabilità adeguata per la struttura.

Assieme al professor Invernizzi S. – il quale aveva già redatto uno dei documenti consultati precedentemente²² riguardo all'utilizzo di geomaglie nella malta di finitura – si è pensato di intraprendere un percorso basato su metodi di calcolo per constatare di quanto si andrebbe a migliorare la prestazione antisismica dell'edificio in esame. E' stata utilizzata anziché una geomaglia in materiale plastico, una più tradizionale rete di juta ECOVERNET J 500 XL fornita dall'azienda TeMa (S1). Sebbene la rete di Juta sia molto meno prestante in comparazione a quella in materiale plastico, è stata scelta per le sue proprietà di alta sostenibilità economica e ambientale (è un materiale naturale), inoltre risulta di facile applicazione e reperibilità sul territorio messicano.

Vengono quindi presentati due metodi di calcolo relativi al nostro caso studio.

4.3.1 Ribaltamento composto di parete

Il ribaltamento composto di parete si manifesta attraverso la rotazione rigida di intere facciate o porzioni di pareti rispetto ad assi in prevalenza orizzontali, accompagnata dal trascinarsi di parti delle strutture murarie appartenenti alle pareti di controvento (95) (Milano, L., Mannella, A., Morisi, C., Martinelli, A., 2009).

Questi tipi di ribaltamento avvengono principalmente a causa dell'assenza di cordoli o catene ai piani, murature con ridotte proprietà meccaniche e orizzontamenti deformabili e/o mal collegati; è quindi necessario introdurre una connessione efficace con le murature ortogonali. I primi sintomi che si manifestano sulla struttura sono quindi delle lesioni diagonali (96) sulle pareti di controvento, assieme al fuori piombo della parete ribaltante e lo sfilamento delle travi degli orizzontamenti. Questi meccanismi possono portare al ribaltamento composto di uno o più livelli della parete.

Ciò che ci si aspetta dalla maglia in juta, assieme alla malta di finitura, è che dia un contributo nel calcolo del momento stabilizzante.

Il processo di calcolo è stato suddiviso in due fasi:

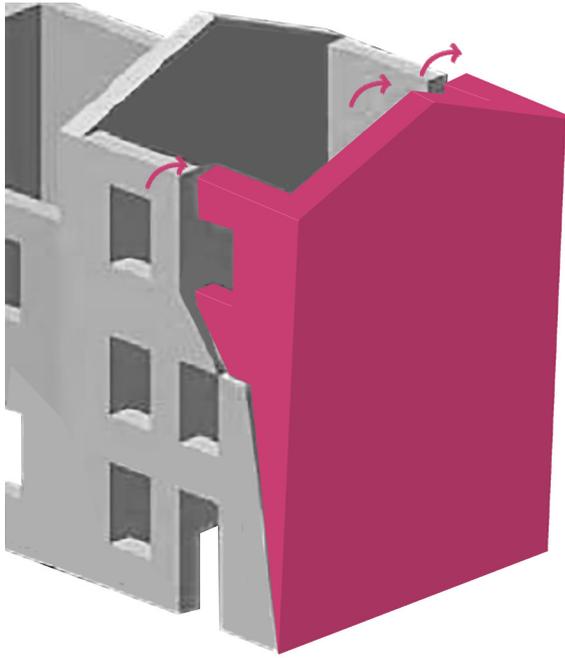
- Nella prima si è calcolato il coefficiente di ribaltamento della parete senza l'ausilio della maglia in juta, per capire quale fosse il coefficiente reale della parete così come l'avremmo costruita noi (97).

- Successivamente si è effettuato lo stesso calcolo ma inserendo le forze dovute alla rete in juta, per capire di che di grandezza questa maglia incrementasse il coefficiente di ribaltamento, richiedendo quindi una maggiore forze di inerzia per portare al ribaltamento la parete in terra cruda (98).

Nella fase iniziale quindi si sono calcolati gli sforzi dovuti alla copertura, alla parete e ai due cunei ribaltanti; il tutto moltiplicato per il coefficiente di ribaltamento α (99).

$$M_{rib} = \alpha \left(2 P_c \frac{2h}{3} + P \frac{h}{2} + 2 Q_c h \right)$$

Nella seguente equazione si considera raddoppiato il peso dei cunei soggetti a ribaltamento, poiché agiscono su entrambi i vertici del muro. Vale lo stesso per il peso della copertura, la quale insiste sui due cunei.

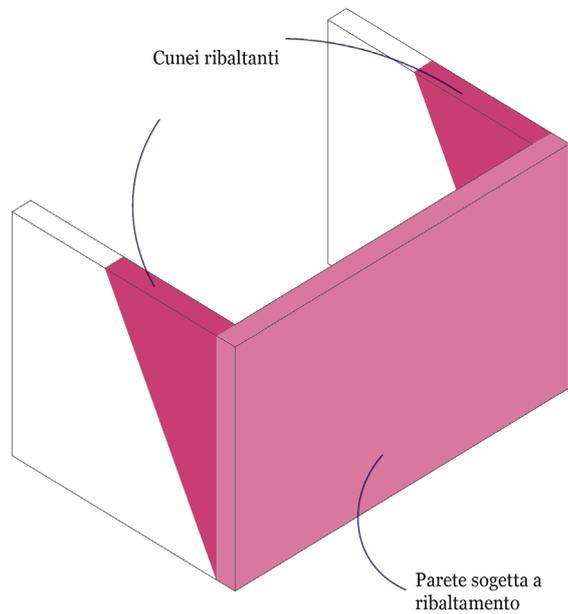


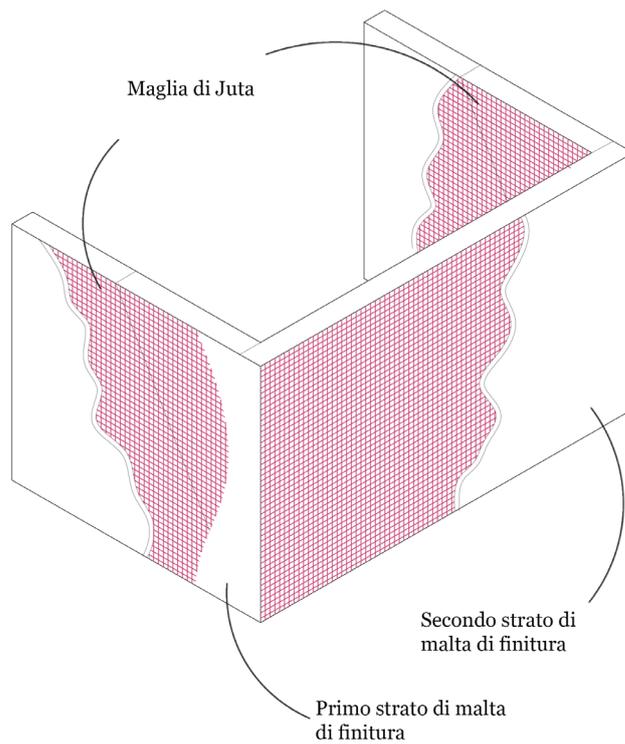
95 ▲ Schema del ribaltamento composto di parete..



96 ▲ Lesioni dovute al ribaltamento composto.
Immagine di Arch. Fot. Vice Comm. Del. Beni Culturali - Sisma Abruzzo 2009.

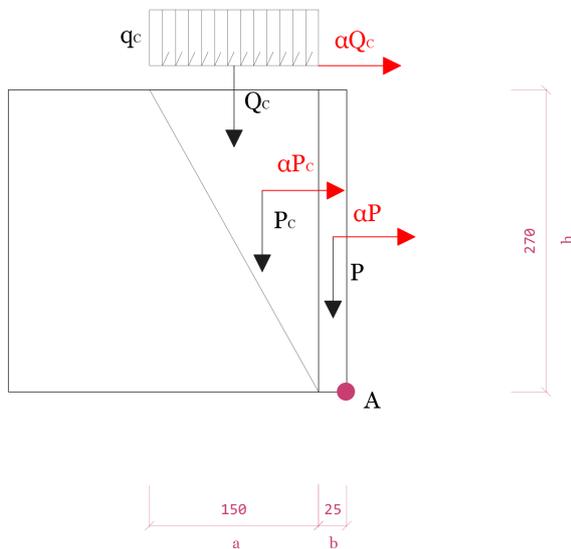
97 ▼ Schema delle parti reagenti nel meccanismo di ribaltamento composto.



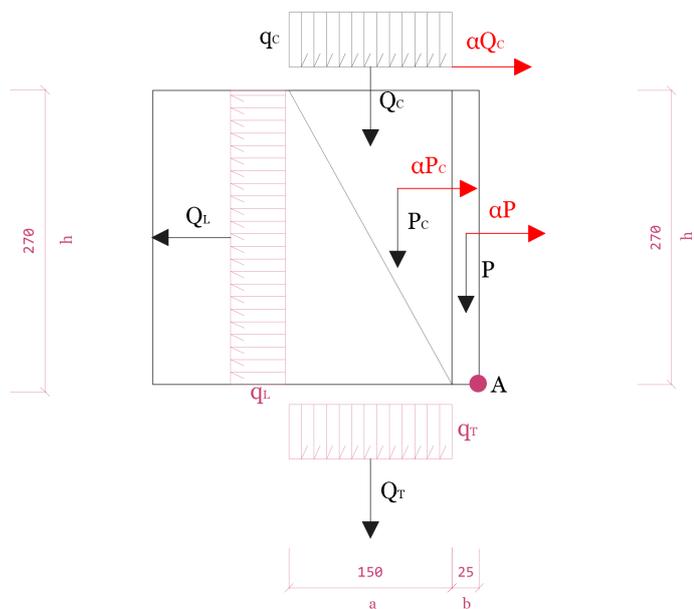


98 ▲ Schema del metodo di posa della maglia strutturale in juta.

99 ▼ Diagramma delle forze senza l'inserimento della maglia strutturale.



100 ▼ Diagramma delle forze con l'inserimento della maglia strutturale.



Si procede al calcolo del momento stabilizzante, nel quale vengono inserite le stesse forze dell'equazione precedente, ma che in questo caso hanno effetto stabilizzante sulla struttura.

$$M_{stab} = 2 P_c \left(b + \frac{a}{3} \right) + P \frac{b}{2} + 2 Q_c \left(\frac{b+a}{2} \right)$$

Il valore definitivo di $\alpha_{0,0}$, sarà quindi:

$$\alpha_{0,0} = \frac{2303}{10396} = 0,22$$

Nella fase successiva si procede al calcolo di $\alpha_{0,1}$ (**100**) che prevede l'inserimento dei due carichi ripartiti q_L e q_T che sono rispettivamente la resistenza a trazione longitudinale e trasversale della rete in juta, i quali valgono rispettivamente 1000 e 800 daN/m (**S1**). I carichi Q_L e Q_T verranno moltiplicati 4 volte poiché viene considerato applicato sia esternamente alla parete, che internamente. Il risultato finale del momento stabilizzante sarà quindi:

$$M_{stab} = 2 P_c \left(b + \frac{a}{3} \right) + P \frac{b}{2} + 2 Q_c \left(\frac{b+a}{2} \right) + 4 Q_T \left(b + \frac{a}{2} \right) + 4 Q_L \frac{h}{2}$$

Il momento ribaltante risulta equivalente a quello calcolato precedentemente, si può ricavare così la nuova $\alpha_{0,1}$:

$$\alpha_{0,1} = \frac{21683}{10396} = 2,08$$

Il moltiplicatore di ribaltamento $\alpha_{0,1} > \alpha_{0,0}$. Ciò significa che sarà necessaria una maggior spinta sismica per far in modo che il muro raggiunga il collasso strutturale. Il muro con la maglia di juta resisterà quindi circa 10 volte in più rispetto a quello senza nessun rinforzo strutturale.

Successivamente a questi calcoli è stata redatta una tabella *Excell* a scopo valutativo, utilizzando la formula per calcolare la α in funzione della q_L e q_T . In questo modo si sono potute sostituire altre resistenze a trazione longitudinali e trasversali di altre reti, non di tipo naturale (**T8**).

Si sono infatti sostituite nei calcoli le resistenze a trazione di due reti plastiche del tipo di quelle utilizzate per segnalare i cantieri edili (**S2**) utilizzate anche nel (Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., Iwaki, C., 2011)³⁶, e una in materiale HDPE ad alta re-

³⁶ Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., Iwaki, C. (2011) 'Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú'.

sistenza **(S3)** utilizzata anche dal professor Invernizzi S. nelle prove in laboratorio.

Si è potuto notare che sebbene i valori ottenuti con la rete TENAX GIGAN siano leggermente maggiori, per la tipologia di edificio costruito in Messico e per la sua facile reperibilità e prezzo contenuto, si può continuare a prediligere la rete in juta. Mentre per quanto riguarda i risultati ottenuti con la rete TENAX 3D grid il discorso è più complesso. Sebbene i risultati raggiunti siano di assoluto rilievo, come consigliato anche nel documento del professor Invernizzi S., non risulta una buona scelta per quanto riguarda il lato economico, è una tecnica troppo esosa e quindi non applicabile in contesti simili a quello del caso studio, dove sia la famiglia che l'associazione, non disponevano di finanze adeguate.

La scelta della TENAX 3D grid rimane comunque un'ottima alternativa per la costruzione di edifici sismoresistenti e come rinforzo strutturale post-costruzione; tuttavia visto il contesto e la natura del nostro edificio, risulta più vantaggioso l'utilizzo di una rete in juta la quale migliora la risisten-

za sismica mantenendo una facile applicazione oltre ad una buona compatibilità con la malta di finitura ed un costo contenuto.

NB: i fogli di calcolo sono in allegato

MATERIALE	LARGHEZZA APERTURA	TRAZIONE L	TRAZIONE T	ALFA
Juta		1.000	800	2.086
TENAX 3d GRID	30	55.000	35.000	97.557
TENAX GI-GAN		1.600	1.600	3.389
TENAX LA-BOR		70	50	0.349

T8 ▲ Comparazione del moltiplicatore di ribaltamento con le varie maglie strutturali.

4.3.2 Flessione orizzontale di parete.

La flessione orizzontale della parete si manifesta con l'espulsione di materiale dalla zona sommitale della parete e col distacco di corpi cuneiformi accompagnato dalla formazione di cerniere cilindriche oblique e verticali per azioni fuori dal piano **(101)** (Milano, L., Mannella, A., Morisi, C., Martinelli, A., 2009).

Le condizioni di vincolanti per la struttura sono quindi l'assenza di vincolo in sommità, ovvero la catena superiore, ed un efficace collegamento delle pareti ortogonali che nel nostro caso avviene grazie alla maglia in juta posta nella malta che permette una maggior coesione della struttura nel suo insieme.

I fattori negativi che possono dar moto a tale cinematismo sono invece una copertura mal collegata alla muratura o spingente su di essa **(102)**, la presenza di nicchie o aperture nella muratura ed infine una eccessiva distanza tra i muri di spinta, la quale denota una parete snella.

Il meccanismo di collasso avviene dopo la iniziale comparsa di lesioni verticali ed

oblique sulle facce esterne ed interne della parete seguite da rigonfiamenti della stessa. In estremi casi può anche avvenire lo sfilamento di travi dal tetto. Normalmente il collasso avviene con la rotazione di una parte della parete (cuneo) attorno alla sua cerniera cilindrica **(103)**. Può avvenire per l'allontanamento delle pareti di controvento o per crisi del materiale nel caso di una cella interclusa in una schiera con una parete confinata lateralmente **(104)**. Inoltre il meccanismo può coinvolgere l'intero spessore del muro o solamente il paramento più esterno in relazione alla struttura muraria.

L'equazione per trovare il moltiplicatore di collasso viene quindi espressa in base all'equazione dei lavori virtuali presenti nella nostra parete di testa. Come ci spiegano infatti i documenti (Milano, L., Mannella, A., Morisi, C., Martinelli, A., 2009)(Achenza, M., Sanna, U., 2009) se l'edificio non ha già presentato dissesti dovuti al meccanismo di flessione orizzontale (e di conseguenza non è possibile conoscere la geometria del dissesto) ed è in presenza di buon ammortamento lungo i cantonali, non è immediato

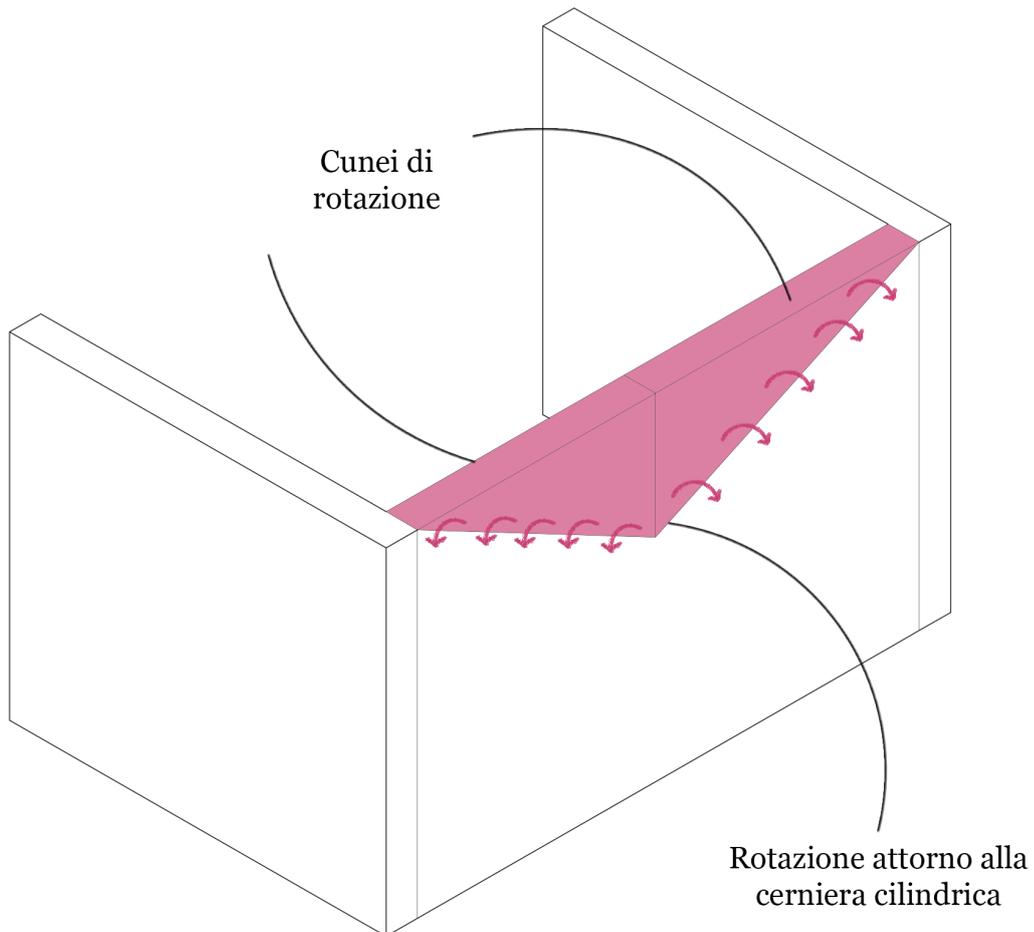


101 ▲ Schema di flessione orizzontale di parete.



102 ▲ Lesioni dovute alla flessione orizzontale di parete. Immagine di Arch. Fot. Vice Comm. Del. Beni Culturali - Sisma Abruzzo 2009.

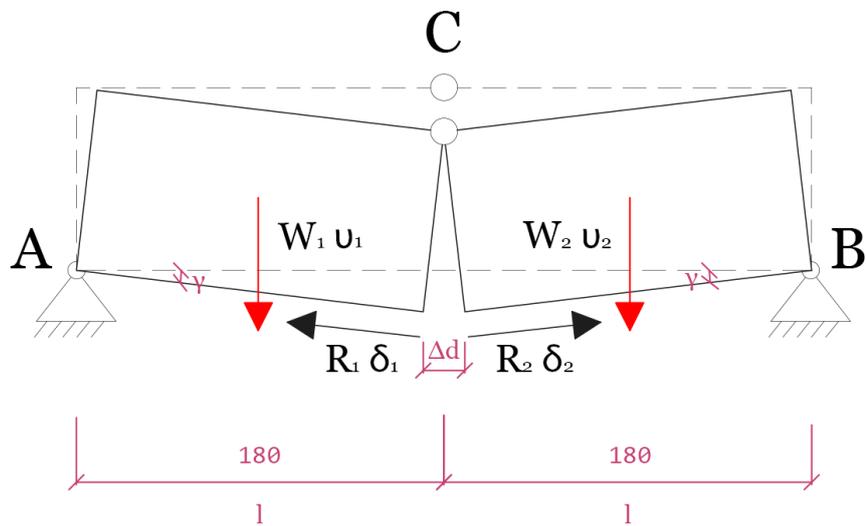
103 ▼ Schema delle parti reagenti nel meccanismo di flessione orizzontale.





104 ▲ Schema di flessione orizzontale di parete con parete confinata lateralmente.

105 ▼ Diagramma delle forze con l'inserimento della maglia strutturale.



definire la geometria del cinematismo più probabile. Occorre quindi calcolare vari moltiplicatori di collasso ed assumere quello minore come valore di λ da associare all'attivazione del meccanismo.

Al fine di semplificare i calcoli si è riadattata quindi l'equazione per la nostra parete in esame, considerandola priva di aperture e con i vincoli in *A* e *B* (105) come due cerniere visto il comportamento che ha la maglia di juta nei confronti dell'intera struttura – impedendo i movimenti orizzontali dei cunei – la quale irrigidisce anche i vertici del nostro edificio. Sono state effettuate varie prove prendendo in considerazione diverse altezze di ribaltamento dei cunei e si è potuto notare che il valore minimo di λ si è trovato nella condizione in cui la rottura avvenga al piede della struttura, quindi per l'altezza totale del muro. Ciò significa che il cinematismo della struttura avverrà per tutti i lavori reali uguali o minori al nostro λ di collasso.

L'equazione dei nostri lavori virtuali risulta quindi essere:

$$\lambda (W_1 v_1 + W_2 v_2) - R_1 \frac{\vartheta_1}{2} - R_2 \frac{\vartheta_1}{2} - R_3 \frac{\vartheta_3}{2} - R_4 \frac{\vartheta_3}{2} - R_5 \frac{\vartheta_5}{2} - R_6 \frac{\vartheta_5}{2} = 0$$

Nello schema (105) non si possono notare le forze verticali, per questo si rimanda allo schema (106). Nel nostro caso possiamo semplificare l'equazione considerando $W_1 = W_2$, visto che si considera il punto di rottura della parete in mezzzeria. Lo stesso vale per $R_1 = R_2$ ed $R_3 = R_4 = R_5 = R_6$.

$$2 \lambda (W_1 v_1) - 2 \left(R_1 \frac{\vartheta_1}{2} \right) - 2 (R_3 \vartheta_3) = 0$$

La soluzione del moltiplicatore del collasso si può quindi semplificare come segue:

$$\lambda = \frac{\left(R_1 \frac{\vartheta_1}{2} \right) + (R_3 \vartheta_3)}{(W_1 v_1)}$$

Per risolvere il seguente metodo di calcolo si è ricorsi allo sviluppo grafico delle forze agenti sulla parete. Si è quindi creato il modello della parete con i cunei di collasso e la maglia di juta disposta longitudinalmente e trasversalmente su di essi. Nel baricentro di tali cunei sono state poste inoltre le forze di ribaltamento W_1 e W_2 (106).

Si sono quindi ruotati i cunei di collasso attorno alla loro cerniera cilindrica di un angolo ν equivalente per entrambi i cunei (106); l'angolo è stato incrementato via via

gradualmente per dimostrare di quanto variasse il moltiplicatore di collasso.

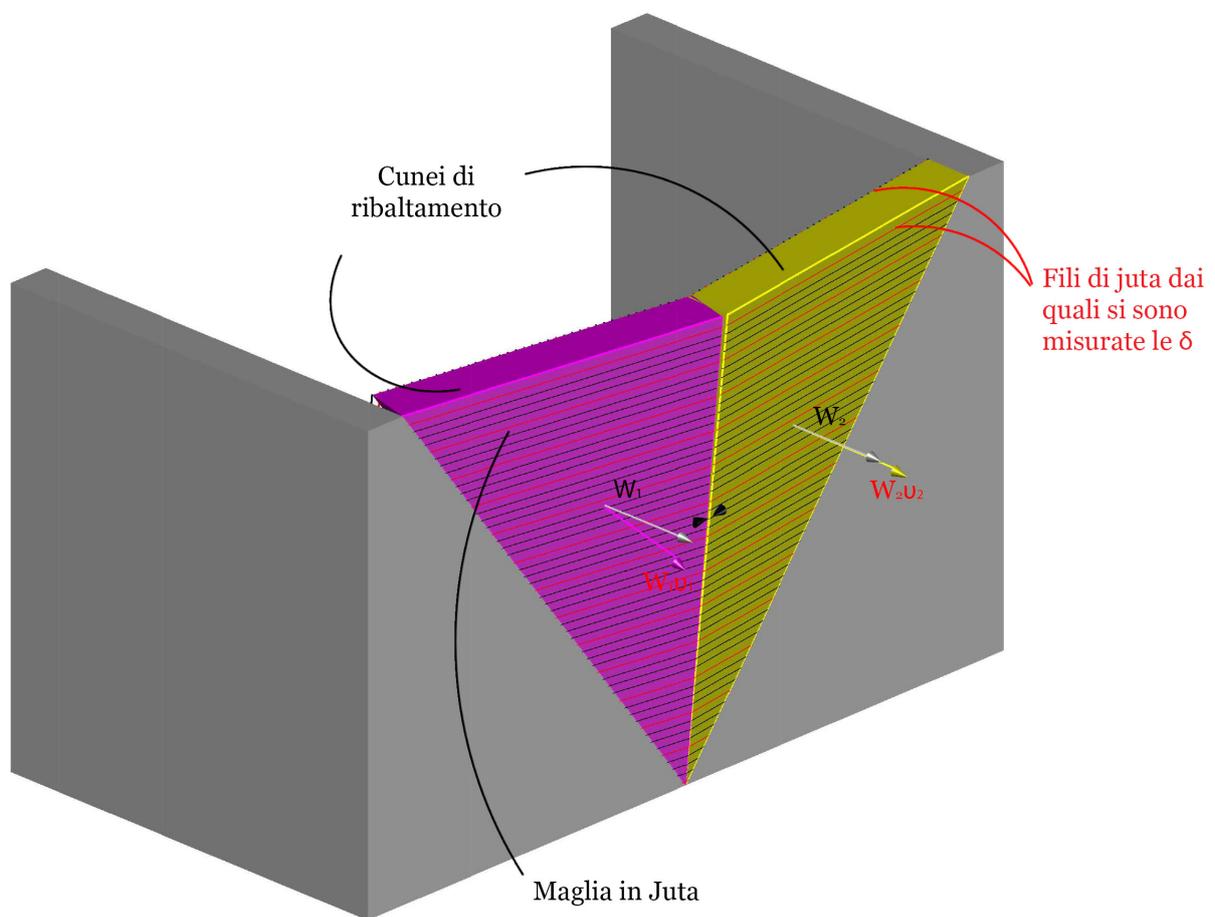
Ad ogni incremento di γ si sono misurati graficamente gli spostamenti \mathbf{u}_1 e \mathbf{u}_2 relativi alle forze W_1 e W_2 **(107)**. Lo spostamento \mathfrak{D}_1 della juta corrisponde ad uno sforzo di allungamento dovuto alle due parti di cuneo che spingono verso l'esterno sulla maglia. Si sono quindi impostate delle linee corrispondenti ai fili resistenti della maglia in juta. Tali fili sono stati disposti ad una distanza costante, incrementando γ si è misurata la distanza d tra i suddetti fili **(108.a)**. Misurate tutte le d_n corrispondenti, si è calcolata con la formula della media ponderata la Δd (corrispondente alla nostra \mathfrak{D}_1) della rete per l'altezza totale della frattura presa in esame **(T1)**. Tale valore \mathfrak{D}_1 è stato diviso a metà poiché la maglia in juta si deformerà e resisterà a trazione nella medesima maniera sia nel cuneo di destra che in quello di sinistra. Le forze R_1 ed R_2 si sono invece calcolate mediante il valore di resistenza a trazione della maglia di juta per le fibre longitudinali, anch'esse normalizzate per una lunghezza pari ad un metro.

Per quanto riguarda gli sforzi a trazione, gli spostamenti \mathfrak{D}_3 e \mathfrak{D}_5 **(108.b)** risultano costanti su tutta la lunghezza della parete e quindi sono presi come valori medi per le forze R_3 , R_4 , R_5 e R_6 .

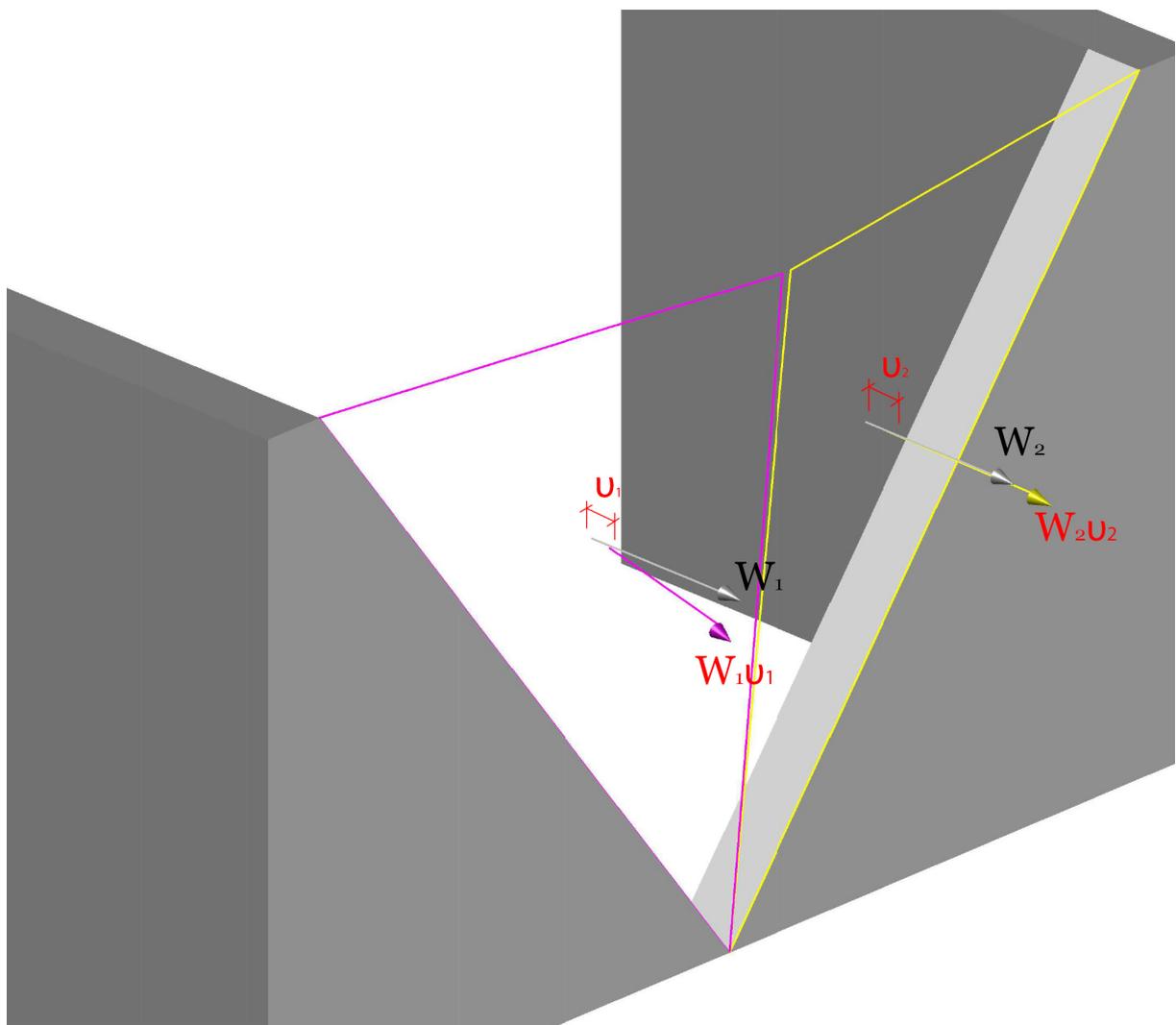
Si sono quindi trovati tutti i valori corrispondenti ad ogni spostamento \mathbf{u} e \mathfrak{D} delle singole forze nel sistema parete **(T9,T10)**; in questa maniera si è potuto calcolare il moltiplicatore di collasso corrispondente ad ogni angolo analizzato γ .

Si è potuto notare come la maglia di juta dia un contributo alla coesione della parete in fase di rotazione dei cunei. Questo contributo risulta minimo in comparazione con quello che darebbe un geomaglia come la TENAX 3D grid **(S3)**, ma comunque favorisce la coesione della parete prima del definitivo collasso.

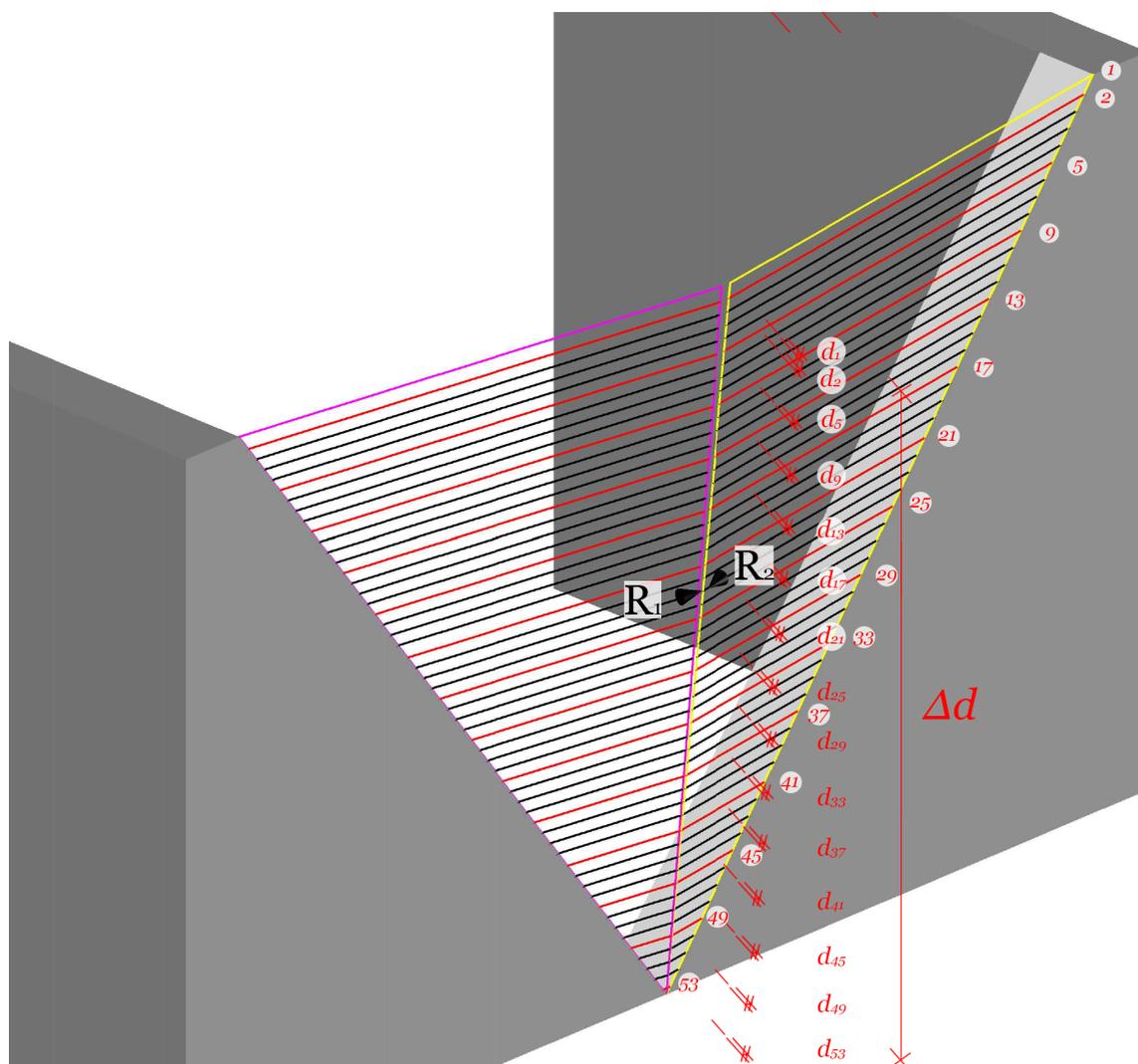
Un altro dato interessante si può notare nella tabella della \mathfrak{D} **(T10)** dove si vede come il \mathfrak{D}_1 in corrispondenza di un angolo γ superiore ai 10° si riscontri un allungamento pari a 0,029 , ovvero 2,9 cm. Sapendo che l'allungamento a rottura della maglia di juta



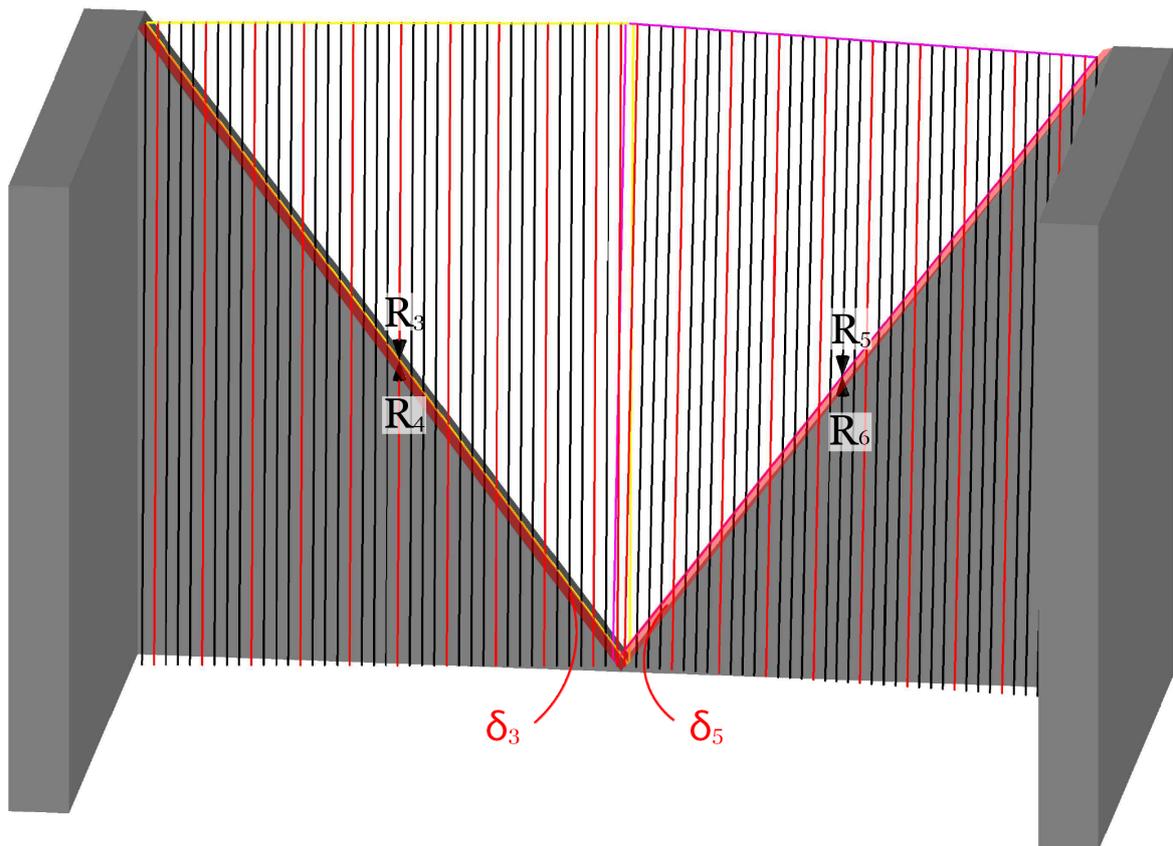
106 ▲ Schema delle forze e degli elementi che intervengono durante la rotazione dei cunei.



107▲ Schema degli spostamenti delle forze ribaltanti dei cunei.



108.a ▲ Schema degli allungamenti della maglia strutturale.



108.b ▲ Schema degli allungamenti della maglia strutturale.

FILI	y	3°	5°	10°	20°	30°	45°
0	2,7	0,0035	0,0098	0,0393	0,1557	0,346	0,7564
2	2,64	0,0035	0,0096	0,0387	0,1523	0,3384	0,7399
5	2,44	0,0032	0,0089	0,0356	0,1408	0,3128	0,6838
9	2,24	0,0029	0,0081	0,0326	0,1292	0,2872	0,6278
13	2,04	0,0027	0,0074	0,0296	0,1177	0,2615	0,5718
17	1,84	0,0024	0,0067	0,0267	0,1062	0,2359	0,5157
21	1,63	0,0021	0,0059	0,0237	0,0941	0,2091	0,4571
25	1,43	0,0019	0,0052	0,0208	0,0826	0,1834	0,4011
29	1,23	0,0016	0,0045	0,0179	0,0711	0,1578	0,3451
33	1,03	0,0014	0,0038	0,0150	0,0595	0,1322	0,289
37	0,83	0,0109	0,0030	0,0121	0,0480	0,1065	0,233
41	0,62	0,0008	0,0023	0,0090	0,0359	0,0798	0,1744
45	0,42	0,0005	0,0015	0,0061	0,0244	0,0542	0,1184
49	0,22	0,0003	0,0008	0,0324	0,0128	0,0285	0,0624
53	0,02	0,0000	0,0001	0,0003	0,0131	0,0029	0,0633
MP		0,0034	0,0071	0,0286	0,1119	0,2297	0,5435

T9 ▲ Allungamento nei singoli fili della maglia strutturale nei vari incrementi di angolo γ .

T10 ▼ Spostamenti ed allungamenti delle varie forze nella flessione orizzontale di parete e moltiplicatore di collasso.

ANGOLO γ	v1	91	93		λ
3°	0,028	0,0034	0,013		0,8247
5°	0,046	0,0071	0,0218		0,8729
10°	0,093	0,029	0,044		1,086
20°	0,183	0,112	0,087		1,511
30°	0,268	0,23	0,129		1,863
45°	0,379	0,543	0,191		2,685

è pari al 4,5% della sua lunghezza, significa che su un metro lineare la maglia di juta si romperà quando si supererà una trazione pari a 4,5 cm. Possiamo quindi ipotizzare che la nostra maglia in juta si rompa al raggiungimento di un angolo γ compreso tra i 10 e i 20°. Per ciò che riguarda la rete sottoposta a sforzo di trazione ϑ_3 , essa raggiunge il punto di allungamento massimo già attorno ai 10° di rotazione.

Mentre per quanto riguarda la rete TENAX GIGAN (S2), che come detto nel paragrafo precedente non ha una resistenza a trazione dissimile dalla rete in juta da noi utilizzata, la resistenza all'allungamento risulta essere molto maggiore. Nello specifico la rete in questione resiste ad un allungamento pari al 16% in base al test TX3 il quale prevede un allungamento di 300 mm/min. Ciò significa che sebbene la percentuale sia alta ci si aspetta che durante il sisma l'allungamento avvenga repentinamente e di conseguenza, la rete si romperà prima del raggiungimento del 16%. Tale rete presenta ad ogni modo un comportamento all'allungamento migliore della rete in juta; è corretto ipotizzare che

possa resistere ad una rotazione dei cunei più ampia con un γ maggiore e di conseguenza garantire una sicurezza globale maggiore alla nostra struttura in terra cruda.

Infine, per quanto riguarda il suddetto meccanismo cinematico, esso minimizza il moltiplicatore di collasso per tutta l'altezza della parete. Questa condizione però non è valida per qualsiasi tipo di parete; in quanto, ognuna avendo una geometria diversa mostrerà risultati differenti al variare di altezza e spessore.

NB: i fogli di calcolo sono in allegato

O

conclusioni

0.4 Conclusioni

Al termine dell'esperienza ci si può ritenere soddisfatti dell'obiettivo prefissatosi nella fase introduttiva: la ricerca di un sistema antisismico da applicare ad una abitazione esistente. I metodi di calcolo hanno dimostrato che grazie alla maglia in juta la stabilità della parete migliora sensibilmente migliorando il limite di collasso.

La maglia in Juta viene posta tra due strati di malta in terra - come finistura superficiale - facendo presa attiva da componente stabilizzante contro gli sforzi dovuti al sisma. Si presenta come un valido metodo di irrigidimento per il nostro edificio, visto il contesto, la facilità di posa in opera, compatibilità materica e il costo.

I dati da noi ottenuti ci fanno capire come l'impiego di questo semplice materiale di origine naturale apposto anche posteriormente alla costruzione del nostro edificio possa migliorarne sensibilmente la resistenza al collasso durante un evento sismico, garantendo una maggior sicurezza per gli inquilini. Ciò riconferma altresì i test effettuati da Blondet M. (*Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., Iwaki, C., 2011*), dove il rinforzo

antisismico era garantito da una semplice maglia in materiale plastico simile a quella presa in esame da noi nella **(T12)**, la quale secondo i nostri calcoli ha da un contributo quasi analogo a quello ottenuto con l'utilizzo della maglia in juta.

L'utilizzo di una maglia di materiale plastico ad alte prestazioni quale per esempio la TENAX 3d GRID, sebbene presenti una resistenza più elevata rispetto alla juta, non è consigliabile per il nostro caso studio messicano, poiché avrebbe un'impatto economico molto più alto rispetto a quello che può avere il materiale di origine naturale. L'utilizzo della geomaglia a matrice plastica risulta invece un'ottima scelta in un campo europeo, dove sia la posa in opera che l'acquisto di tale materiale risultano avere un prezzo contenuto. Come consigliato da Invernizzi S. (*Invernizzi, S., Mattone, M., Vachey, P., Gentile, M., 2017*) quindi, può essere presa in considerazione in alcuni casi specifici dove la stabilità strutturale dell'edificio sia realmente compromessa e la tipologia di intervento debba risultare il meno invasiva possibile. Può essere il caso di una

ristrutturazione di un edificio storico in terra cruda, nel quale si voglia consolidarlo, mantenendolo in uno stato monumentale. In questo, come in altri casi, la georete TENAX 3d GRID potrebbe essere un ottimo approccio di restauro.

Il rinforzo antisismico con la maglia in juta vuole quindi essere un surplus, un contributo aggiuntivo per una sicurezza strutturale in un edificio ex novo, il quale si propone già di per sé con una stabilità agli eventi sismici discreta. Tale rinforzo è preferibile in quegli interventi in cui si abbia un'attenzione particolare alla sostenibilità economica e ambientale, visto il costo irrisorio e l'origine naturale della materia prima.

La finalità della tesi è quella di enucleare le corrette procedure per la costruzione di un edificio in terra cruda, tenendo in considerazione alcuni aspetti progettuali imprescindibili quali:

- Effettuare i test specifici sulla terra cruda da utilizzare durante la costruzione dell'edificio, quanto meno quelli da campo;
- Mantenere le proporzioni opportune tra

pieni e vuoti nell'edificio;

- Creare ambienti quadrangolari con spessori delle pareti adeguate;
- Utilizzare una tipologia di copertura di tipo leggero per una maggior sicurezza in ambiente sismico;
- Introdurre la maglia in juta che permette una maggior coesione strutturale tra le pareti dell'edificio.

0.5 Riferimenti Bibliografici

Capitolo 0

Bibliografia:

- Instituto Belisario Domínguez (2017) 'Recuento de los daños 7S y 19S: a un mes de la tragedia'. Disponibile al seguente link: http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/bitstream/handle/123456789/3721/2017_16_NE_Recuento%20de%20da%c3%b1os_231017.pdf?sequence=1&isAllowed=y (Ultimo accesso:11/07/2019).
- Guerrero Baca, L. F. (2011) 'Pasado y porvenir de la arquitectura de tapia', *Bitácora* 22. Disponibile al seguente link: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/bitacora/article/view/25519/24091> (Ultimo accesso:11/07/2019).
- Jaguaco Canchig, S. del Rocio (2007) *Uso del adobe como material de construccion*. Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., Iwaki, C.(2011), 'Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú', PUCP. Disponibile al seguente link: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/1251/1336> (Ultimo accesso:11/07/2019).
- Gernot, M. (2009) *Building with Earth: design and technology of a sustainable Architecture*. Basel: Birkhauser.

Sitografia:

- UNAM (2017) '¿Qué ocurrió el 19 de septiembre de 2017 en México?'. Disponibile al seguente link: <http://ciencia.unam.mx/leer/652/-que-ocurrio-el-19-de-septiembre-de-2017-en-mexico-> (Ultimo accesso:11/07/2019).
- UNAM (2017) '¿Es inminente otro gran sismo en la brecha de Guerrero?'. Disponibile al seguente link: <http://ciencia.unam.mx/leer/783/-es-inminente-otro-gran-sismo-en-la-brecha-de-guerrero-> (Ultimo accesso:11/07/2019).
- BBC (2017). Disponibile al seguente link: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-41209298> (Ultimo accesso:11/07/2019).
- BBC (2017). Disponibile al seguente link: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-41201053> (Ultimo accesso:11/07/2019).
- Animal político (2017). Disponibile al seguente link: <https://www.animalpolitico.com/2017/09/axochiapan-sismo-casas-afectadas-epicentro/> (Ultimo accesso:11/07/2019).
- SSN (2017). Disponibile al seguente link: http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf (Ultimo accesso:11/07/2019).

Capitolo 1

Bibliografia:

- Bertagnin, M. (1999) *Architetture di terra cruda in Italia, tipologie, tecnologie e culture costruttive*. Monfalcone (Gorizia): Edicom Edizioni.
- Gernot, M. (2005) *Building with Earth: design and technology of a sustainable Architecture*. Basel: Birkhauser.
- Scudo, G., Narici, B., Talamo, C. (2001) *Costruire con la terra, tecniche costruttive, campi di utilizzo e prestazioni*, Arzano (Napoli) Sistemi Editoriali.
- Arrigoni, A., Ciancio, D., Beckett, C.T.S., Dotelli, G. (2016) *Improving rammed earth building's sustainability through life cycle assessment (lca)*. SBE series. Disponibile al seguente link: https://www.researchgate.net/publication/305265438_Improving_rammed_earth_walls'_sustainability_through_life_cycle_assessment_LCA (Ultimo accesso:11/07/2019).
- Minke, M. (2005) *Manual de construccion en Tierra. Editorial Fin de Siglo*.
- Daneels, A., Guerrero, L. (2013); *RESCATE DE ESTRUCTURAS PREHISPÁNICAS DE BARRO CRUDO EN LA COSTA VERACRUZANA, MÉXICO*. Construcción con tierra. Pasado, presente y futuro. Congreso de Arquitectura de tierra en Cuenca de Campos Valladolid: Universidad de Valladolid. Disponibile al seguente link: <http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2013/01tr-daneels.pdf> (Ultimo accesso:11/07/2019).
- Centro de Investigación Hábitat y Energía, Instituto de Arte Americano (2007) *Construcción con tierra*. Disponibile al seguente link: http://www.redproterra.org/uploads/publications/Construccion_con_Tierra_3_2007.pdf (Ultimo accesso:11/07/2019).
- Guerrero Baca, L.F. (2017) *Pasado y porvenir de la construcción con bajareque*. Disponibile al seguente link: editorialrestauro.com.mx/pasado-y-porvenir-de-la-construccion-con-bajareque/ (Ultimo accesso:11/07/2019).
- Keable, J. (1996) *Rammed Earth Structures, a code of practice*. Londra: Intermediate Technology Publication Ltd, Londra.
- Bollini, G. a cura di, (2006) *Costruire in Terra Cruda Oggi*. Monfalcone (Gorizia) EdicomEdizioni.
- Bertagnin, M. (1996) *Bioedilizia: progettare e costruire in modo ecologicamente consapevole*. Padova: Edizioni GB.
- Giorgi, A. (2014) *Guida Pratica alle costruzioni in terra cruda*, Roma: Aracne editrice.
- INEGI, XII Censo General de Población y vivienda, México, <<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/>>, 2002.
- Correa Giraldo, V.M., Queiros, M., Ordoñez Candelaria, V.R., López Muñoz, F., Flores Méndez, E., Zapata López, J. (2017) *EL BAHAREQUE, UN SISTEMA CONSTRUCTIVO SISMORESISTENTE Y SUSTENTABLE*, SMEI. Disponibile al

seguinte link: http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_18/te_10/ar_14.pdf (Ultimo acceso:11/07/2019).

Sitografia:

- INEGI (2017), '*Anuario estadístico y geográfico de Sinaloa*'. Disponible al link: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825094898.pdf (Ultimo acceso:11/07/2019).
- INEGI (2017), '*Anuario estadístico y geográfico de Sonora*'. Disponible al link: https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/SON_ANUARIO_PDF.pdf (Ultimo acceso:11/07/2019).
- INEGI, (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Baja California Sur*'. Disponible al link: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825094881.pdf (Ultimo acceso:11/07/2019).
- INEGI, (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Jalisco*'. Disponible al link: <https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/Anuario%20Estad%C3%ADstico%20y%20Geogr%C3%A1fico%20de%20Jalisco%202017.pdf> (Ultimo acceso:11/07/2019).
- INEGI, (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de San Luis Potosí*'. Disponi-

- bilingue al siguiente link: https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/SLP_ANUARIO_PDF.pdf (Ultimo acceso:11/07/2019).
- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Aguascalientes*'. Disponible al siguiente link: https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/AGS_ANUARIO_PDF.pdf (Ultimo acceso:11/07/2019).
- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Tamaulipas*'. Disponible al siguiente link: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825094928.pdf (Ultimo acceso:11/07/2019).
- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Zacatecas*'. Disponible al siguiente link: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825092047.pdf (Ultimo acceso:11/07/2019).
- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Nuevo León*'. Disponible al siguiente link: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825094911.pdf (Ultimo acceso:11/07/2019).
- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Coahuila de Zaragoza*'

za'. Disponible al siguiente link:https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/COAH_ANUARIO_PDF.pdf (Ultimo acceso:11/07/2019).

- INEGI (2015) '*Anuario estadístico y geográfico de Chihuahua*'. Disponible al siguiente link:http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2015/702825076191.pdf (Ultimo acceso:11/07/2019).

- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Quintana Roo*'. Disponible al siguiente link: https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/QROO_ANUARIO_PDF.pdf (Ultimo acceso:11/07/2019).

- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Yucatan*'. Disponible al siguiente link:https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/YUC_ANUARIO_PDF.pdf (Ultimo acceso:11/07/2019).

- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Tabasco*'. Disponible al siguiente link:http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825095123.pdf (Ultimo acceso:11/07/2019).

- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Chiapas*'. Disponible al siguiente link:[\[PDF.pdf\]\(#\) \(Ultimo acceso:11/07/2019\).](https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/CHIS_ANUARIO_</p></div><div data-bbox=)

- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Veracruz*'. Disponible al siguiente link: <http://ceieg.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2018/04/AE-GEV-2017.pdf> (Ultimo acceso:11/07/2019).

- INEGI (2015) '*Anuario estadístico y geográfico de Guerrero*'. Disponible al siguiente link: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2015/702825076900.pdf (Ultimo acceso:11/07/2019).

- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Puebla*'. Disponible al siguiente link:https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/PUE_ANUARIO_PDF.pdf (Ultimo acceso:11/07/2019).

- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Tlaxcala*'. Disponible al siguiente link: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825096212.pdf (Ultimo acceso:11/07/2019).

- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Colima*'. Disponible al siguiente link: https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/COL_ANUARIO_PDF.pdf (Ultimo acceso:11/07/2019).

- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo*'.

Disponibile al seguente link: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825092092.pdf (Ultimo accesso:11/07/2019).

- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Guanajuato*'. Disponibile al seguente link: https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/GTO_ANUARIO_PDF.pdf (Ultimo accesso:11/07/2019).

- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Nayarit*'. Disponibile al seguente link: https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/NAY_ANUARIO_PDF.pdf (Ultimo accesso:11/07/2019).

- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Durango*'. Disponibile al seguente link: https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/DGO_ANUARIO_PDF.pdf (Ultimo accesso:11/07/2019).

- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Campeche*'. Disponibile al seguente link: https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/CAM_ANUARIO_PDF.pdf (Ultimo accesso:11/07/2019).

- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Querétaro*'. Disponibile al seguente link: https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/QRO_ANUARIO_PDF.pdf (Ultimo accesso:11/07/2019).

- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de Morelos*'. Disponibile al seguente link: [http://www.datatur.sectur.gob.](http://www.datatur.sectur.gob.mx/itxef_docs/mor_anuario_pdf.pdf)

[mx/itxef_docs/mor_anuario_pdf.pdf](http://www.datatur.sectur.gob.mx/itxef_docs/mor_anuario_pdf.pdf)>

- INEGI (2017) '*Anuario estadístico y geográfico de México*'. Disponibile al seguente link: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2015/702825077211.pdf (Ultimo accesso:11/07/2019).

- INEGI (2015) '*Anuario estadístico y geográfico dl Distrito Federal*'. Disponibile al seguente link: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2015/702825076924.pdf (Ultimo accesso:11/07/2019).

- INEGI (2015) '*Anuario estadístico y geográfico de Oaxaca*'. Disponibile al seguente link: https://books.google.it/books?id=mGBUDwAAQBAJ&pg=PP3&lp-g=PP3&dq=an+estadistico+y+geografico+estado+de+oaxaca+2015&source=bl&ots=XfmwYTJH12&sig=ACfU3U3Ho_EtovJ-5SVpFEMZhFimdOdfwQ&hl=it&sa=X&ved=2ahUKEwi2u9j5rpPhAhVRY1AKHTt6Di-8Q6AEwCXoECAkQAQ#v=onepage&q=adobe&f=false (Ultimo accesso:11/07/2019).

- CRATerre (2018). Disponibile al seguente link: http://craterre.org/galerie-des-images/default/gallery/38/gallery_view/Gallery/ctl/galerie-des-images/default/gallery/38/gallery_view/Gallery (Ultimo accesso:11/07/2019).

Tesi di laurea:

- Lo Cigno, L. (a.a. 2009-2010) *Progettare la sostenibilità del paesaggio costruito nei climi aridi: M'Hamid El Ghezlane (sud Marocco) come caso paradigmatico per l'ampliamento dei villaggi rurali in terra cruda*, Politecnico di Torino, rel. Alessandro Mazzotta ; correl. Ignasi Pérez Arnal, Francesca De Filippi.

- Guelfi, S. (a.a. 2012-2013) *Una vivienda messicana : progetto di autocostruzione in terra cruda per le comunità rurali di Oaxaca*, Politecnico di Torino, rel. Simonetta Lucia Pagliolico, Riccardo Balbo, Francesca De Filippi.

- Mercadante, A. (a.a. 2015-2016) *Le case in terra cruda nell'alessandrino : ipotesi di recupero di un complesso rurale abbandonato*, Politecnico di Torino, rel. Andrea Bocco.

Video:

- Riviera Vidal, A. (2013) *EL ADOBE, manual audiovisual de reforzamiento*, Consejo Nacional de la Cultura y Arte, Gobierno de Chile, disponibile al link: https://youtu.be/-M4iY4Zh_oA (Ultimo accesso:11/07/2019).

Capítulo 2

Bibliografía:

- Jaguaco Canchig, S. del Rocio (2007) *Uso del adobe como material de construcción*. Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Gernot, M. (2005) *Building with Earth: design and technology of a sustainable Architecture*. Basel: Birkhauser.
- Daneels, A., Guerrero L. (2013) *RESCATE DE ESTRUCTURAS PREHISPÁNICAS DE BARRO CRUDO EN LA COSTA VERACRUZANA, MÉXICO*. En: *Construcción con tierra. Pasado, presente y futuro*. Congreso de Arquitectura de tierra en Cuenca de Campos 2012. [online]. Valladolid: Universidad de Valladolid. Disponible al siguiente link: <http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2013/01tr-daneels.pdf> (Último acceso:11/07/2019).
- Centro de Investigación Hábitat y Energía, Instituto de Arte Americano (2007) *Construcción con tierra*. Disponible al siguiente link: http://www.redproterra.org/uploads/publications/Construccion_con_Tierra_3_2007.pdf (Último acceso:11/07/2019).
- Luis Fernando Guerrero Baca, L.F. (2017) *Pasado y porvenir de la construcción con bajareque*. México: Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco. Disponible al siguiente link: editorialrestauromx.com.mx/pasado-y-porvenir-de-la-construccion-con-bajareque/ (Último acceso:11/07/2019).
- Keable, J. (1996) *Rammed Earth Structu-*

res, a code of practice. Londra: Intermediate Technology Publication Ltd.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010) *Principales resultados del Censo de Población y Vivienda 2010, México*. Disponible al siguiente link: http://www.planetaj.cruzrojamexicana.org.mx/pagnacional/secciones/Juventud/Contenido/PlanetaJ/downloadfiles/CENSO2010_principales_resultados.pdf (Último acceso:11/07/2019).
- Flores Rodríguez, L. (2009) *La Vivienda en México y la población en condiciones de pobreza*. Disponible al siguiente link: file:///C:/Users/utente/Downloads/Vivienda_mexico_poblacion_docto63.pdf (Último acceso:11/07/2019).
- Bertagnin, M. (1995) *Costruzioni in terra cruda: Manualistica ed esperienze didattiche*, ESITI. Torino: C.L.U.T. Editrice.

Sitografía:

- Construyendo. Disponible al siguiente link: <https://construyendo.org/home-3?> (Último acceso:11/07/2019).
- Echale. Disponible al siguiente link: <http://www.echale.com.mx/> (Último acceso:11/07/2019).
- Vamos a dar. Disponible al siguiente link: <http://www.vamosadar.org.mx/noticias/?p=857> (Último acceso:11/07/2019).
- Donadora. Disponible al siguiente link: <https://donadora.mx/campanas/>

reconstruccion-morelos> (Ultimo accesso:11/07/2019).

Tesi di laurea:

- Guelfi, S. (a.a. 2012-2013) *Una vivienda messicana : progetto di autocostruzione in terra cruda per le comunità rurali di Oaxaca*, Politecnico di Torino, rel. Simonetta Lucia Pagliolico, Riccardo Balbo, Francesca De Filippi.

- De Mattia, C., Perano, A. (a.a. 2016-2017) *Costruire nel paesaggio rurale alpino : il caso di Ferriere in Valle Stura : l'approccio H BIM applicato al cantiere didattico*. Politecnico di Torino, rel. Daniele Regis, correl. Antonia Teresa Spanò.

- Peditto, S. (a.a. 2011-2012) *Costruire con la comunità : esperienza di costruzione di un edificio rurale in terra cruda nella regione di Oaxaca, Messico*. Politecnico di Torino, rel. Jean Marc Tulliani, correl. Francesca De Filippi, con la collaborazione di CRD-PVS, Politecnico di Torino, Associazione Archintorno.

Capítulo 3

Bibliografía:

- Gallego, R., Arto, I. (2015) *Evaluation of seismic behaviour of rammed earth structures*, University of Granada, in *Earthen Architecture: Past, Present and Future*, London: Taylor & Francis Group.
- Dipasquale, L., Mecca, S. (2015), *Local Seismic culture in the Mediterranean region*”, in *Seismic Retrofitting: Learning from Vernacular Architecture*. London: CRC Press.
- Gutiérrez, L., Manco, T., Loaiza, C., Blondet, M. (2003) ‘*Características sísmicas de las construcciones de tierra en el Perú, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil*’. Disponible al siguiente link: <https://www.researchgate.net/publication/268000161> (Último acceso:11/07/2019).
- Paradiso, M., Bizzetti, F., Perria, E., Farigu, A., Lotti, O. (2017) ‘*Low-cost adobe structures with bamboo frame additives and bamboo frames. Strength tests*’. Disponible al siguiente link: <https://flore.unifi.it/retrieve/handle/2158/1107277/285165/ARTICOLO%20SOS%20TIERRA%20165.pdf> (Último acceso:11/07/2019).
- Invernizzi, S., Mattone, M., Vachey, P., Gentile, M. (2017) ‘*Experimental study of adobe walls with geogrid reinforced mud plaster*’. Disponible al siguiente link: https://www.researchgate.net/publication/320174536_Experimental_study_of_adobe_walls_with_geogrid_reinforced_mud_plaster (Último acceso:11/07/2019).
- Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., Iwaki, C. (2011) ‘*Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú*’. Disponible al siguiente link: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/1251/1336> (Último acceso:11/07/2019).
- Ruiz Valencia, D., López Pérez, C., Rivera, J.C. (2012) ‘*Propuesta de normativa para la rehabilitación sísmica de edificaciones patrimoniales, Bogotá*’. Disponible al siguiente link: <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/revApuntesArq/article/view/8767> (Último acceso:11/07/2019).
- Yasmin, L.E., Reyes, J.C., Ruiz Valencia, D.M., Phillips, C. (2007) ‘*Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada*’. Disponible al siguiente link: https://www.researchgate.net/publication/28228193_Estudios_de_vulnerabilidad_sismica_rehabilitacion_y_refuerzo_de_casas_en_adobe_y_tapia_pisada (Último acceso:11/07/2019).
- Yamín Lacouture, L.E., Bernal, C.P., Reyes Ortiz, J.C., Ruiz Valencia, D. (2007) ‘*Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada*’, *APUNTES* vol. 20, n. 2. Disponible al siguiente link: https://www.researchgate.net/publication/28228193_Estudios_de_vulnerabilidad_sismica_rehabilitacion_y_refuerzo_de_ca

sas_en_adobe_y_tapia_pisada (Ultimo accesso:11/07/2019).

- Hernández-Salazar, I. (2013) 'Restauración de arquitectura de tierra en zonas sísmicas, El caso de Costa Rica'. Disponibile al seguente link: https://www.researchgate.net/publication/316214638_Restauracion_de_arquitectura_de_tierra_en_zonas_sismicas_El_caso_de_Costa_Rica (Ultimo accesso:11/07/2019).

- Briccoli Bati, S., Fagone, M., Loccarini, F., Ranocchii, G. (2013) 'Jute fabric to improve the mechanical properties of rammed earth constructions'. Disponibile al seguente link: <https://flore.unifi.it/handle/2158/810873#.XRDnzOgzaMo> (Ultimo accesso:11/07/2019).

- Rivera Vidal, A. (2017) 'The Chilean adobe as a seismic vernacular technology, the study of "Norte Chico" area'. Disponibile al seguente link: https://www.academia.edu/35961339/The_Chilean_adobe_as_a_seismic_vernacular_technology_the_study_of_the_Norte_Chico_zone (Ultimo accesso:11/07/2019).

- Michiels, T., (2014) 'Seismic retrofitting techniques for historic adobe buildings'. Disponibile al seguente link: https://www.researchgate.net/publication/277689468_Seismic_Retrofitting_Techniques_for_Historic_Adobe_Buildings (Ultimo accesso:11/07/2019).

- Morris, H., Worth, M. (2011) 'The history of New Zealand housing and the performan-

ce of different styles in the 2011 Christchurch earthquakes'. Auckland: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Auckland.

- Mileto, C., López-Manzanares, F.V., García-Soriano, L. Cristini, V. (2017) *Vernacular and Earthen Architecture: Conservation and Sustainability*. London: CRC Press.

- Mileto, C., Vegas, F., García Soriano, L., Cristini, V. (2014) *Earthen Architecture: Past, Present and Future*. London: CRC Press.

- Correia, M., Carlos, G., Rocha, S. (2013) *Vernacular Heritage and Earthen Architecture*. London: CRC Press.

- Kumar Shukla, S. (2016) *An introduction to Geosynthetic engineering*. London: CRC Press.

Sitografia:

- Normativa NZS 4299:1998 (1998). Disponibile al seguente link: http://www.eastue.org/project/linea-adobe/norme/NZD4299-1998-Earth_Buildings_Not_Requiring_Specific_Design.pdf (Ultimo accesso:11/07/2019).

Tesi di laurea:

- Torres Duena, S.J. (a.a. 2018-2019) *La capacità antisismica e il miglioramento delle strutture in terra cruda. Architettura in terra cruda per il contesto urbano di Bogotá, Colombia*, Politecnico di Torino,

Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá,
, rel. De Filippi Francesca, Restuccia Lucia-
na, Pennacchio Roberto.

Capitolo 4

Bibliografia:

- Charleson, A. (2008) *Seismic design for architects*. Oxford: Architectural Press.
- [29] Milano, L., Mannella, A., Morisi, C., Martinelli, A. (2009) 'Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso locali negli edifici esistenti in muratura e dei relativi modelli cinematici di analisi, Regione Abruzzo'. Disponibile al seguente link: http://www.reluis.it/doc/emergenza_terremoto_abruzzo/Schede_Meccanismi.pdf (Ultimo accesso:11/07/2019).
- *Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú*, 2011.
- Achenza, M., Sanna, U. (2009) *Il manuale tematico della terra cruda*, DEI tipografia del Genio Civile.
- Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., Iwaki, C. (2011) 'Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú'. Disponibile al seguente link: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/1251/1336> (Ultimo accesso:11/07/2019).
- Como, M. (2015) *Statica delle costruzioni storiche in muratura : archi, volte, cupole, architetture monumentali, edifici sotto carichi verticali e sotto sisma*. Aracne.
- Hulle, A., Kadole, Katkar, P. (2015) 'Agave Americana Leaf Fibers'. Disponibile al seguente link: <https://www.mdpi.com/2079-6439/3/1/64> (Ultimo accesso:11/07/2019).

com/2079-6439/3/1/64 (Ultimo accesso:11/07/2019).

- Ministerio De Vivienda, Construcción y Saneamiento del Peru (2017) 'NORMA E.080 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN CON TIERRA REFORZADA'. Disponibile al seguente link: http://procurement-notices.undp.org/view_file.cfm?doc_id=109376 (Ultimo accesso:11/07/2019).
- Andreolli, M., Tommasi, R. (2009) 'Esempio di dimensionamento di una copertura in legno'. Disponibile al seguente link: <http://risponde.promolegno.com/uploads/media/Esempio-di-dimensionamento-di-una-copertura-lignea.pdf> (Ultimo accesso:11/07/2019).

Tesi di laurea:

- Accolla, E. (a.a. 2018-2019) *Modellazione e verifica di una struttura in muratura rinforzata con FRP*, Politecnico di Torino, rel. Rosario Ceravolo, Andrea Alberto, Elena Pinotti.
- Franco, L. (a.a. 2017-2018) *Sistema di rinforzo sismoresistente per edifici realizzati in terra cruda*, Politecnico di Torino, rel. Invernizzi Stefano, corell. Manuela Mattonne.

0.6 Ringraziamenti

È da tanto tempo che aspetto di scrivere queste ultime righe. Ho aspettato fino all'ultimo, fino alla fine. Forse perché volevo che attorno a queste parole si creasse una sorta di magia, un momento evanescente in cui tutto fosse perfetto, in cui la tesi fosse finita e non rimanessero altro che queste ultime poche righe. Poche si fa per dire, purtroppo non ho una buona capacità di sintesi. Stoppo la musica per concentrarmi meglio, perché meritate tutto da me.

Innanzitutto voglio ringraziare i miei Relatori e Correlatori: *Bosia, Pennacchio e Invernizzi*, senza loro non sarei riuscito ad accedere al workshop e di conseguenza a realizzare questa tesi che per me segna la chiusura più che della mia carriera di un ideale che mi ero fatto dell'Erasmus. Ci tengo a ringraziare anche gli Architetti: *Fabiola, Alvaro e Joffré* i quali mi hanno accompagnato passo a passo nei 10 giorni di workshop ad Ixcamilpa. Ed inoltre il mio pensiero va a *José Luis Jaspeado Escaloña*, il Maestro di architettura che tutti gli studenti dovrebbero avere, grazie per avermi insegnato che c'è un modo divertente di insegnare e di vivere le lezioni.

Grazie a tutti i miei parenti, ai miei *genitori*, per avermi supportato in ogni momento, qualsiasi cosa facessi, qualsiasi decisione prendessi, per non avermi mai giudicato e per essere stati sempre buoni con me (alle volte persino troppo). Ai miei *fratelli*, mi rispecchio in voi, cercando di migliorarmi dove posso, sono felice di ciò che avete creato, onorato di come mi trattate e

spronate nelle mie decisioni. So che anche *Marti e Cla* fanno lo stesso, e assieme avete dato alla luce ed educato nella miglior maniera i piccoli della famiglia.

Grazie a *Cri ed Ale*, siete un porto sicuro sempre, da ormai quindici anni. *Ale* sei una persona molto importante per me, il pacere delle situazioni, quello razionale; purtroppo so di non riuscire a dimostrarti il mio affetto nella maniera più corretta, nemmeno a parole, ma devi fidarti. Spero che crescendo riuscirai ad essere come *Cristina*: forte e coraggiosa, ma buona e onesta. Grazie a *Edo e Gari*, due colonne, voi siete il mio *yin e yang*, anche voi siete nella mia vita da troppo tempo, mi conoscete e mi supportate sempre. Con voi so che la risata è assicurata e se ci troviamo nello stesso tavolo tutti assieme, beh allora lì è proprio la fine. Siete stati la mia brezza marina e la rugiada sulle foglie autunnali, gli unici che mi insultavano per quanto ci stessi mettendo a fare la tesi e allo stesso tempo mi chiedessero di uscire sempre. Con voi la scrittura è stata sicuramente più tormentata, ma non avrei raggiunto questo risultato.

Grazie ai miei compagni di università, mi avete accompagnato in questo lungo percorso: *Ale, Pasto e Cianni*, con voi i pranzi sembravano sempre un pretesto per parlare e staccare dalla monotonia, mentre *Fede, Fra e Carla*, con voi la competitività prendeva una sfumatura tutta particolare, ci siamo sempre aiutati molto ed i risultati si sono visti in maniera tangibile.

Grazie a *Casa 7*, il luogo in cui ho incontrato le persone più belle del mio viaggio e con cui ho condiviso gioie e dolori. *Rebeca*, la messicana con la risata più bella che io abbia mai sentito, grazie per aver sopportato i miei problemi sentimentali e avermi sempre consolato, con te le parole erano superflue perchè mi capivi con uno sguardo appena entravo in casa. *Marine*, tu sei il prototipo della bella francesina, sembra ti abbiano disegnato con matita e carboncino sulle rive della Senna, ma sei molto di più: donna coraggiosa e avventuriera, non temi nulla. *Charlski*, quando andiamo in giro tu sembri più italiano di me, mi metti a disagio, ma sei davvero fortissimo, con te ogni momento è una risata continua e spero di passare ancora tanto tempo in tua presenza. *Julie*, la quieta e più sbadata francese che io abbia mai conosciuto. *Ilaria*, io e te ci siamo considerati poco, sappiamo il perché; mi dai fastidio, ma sei una persona con un cuore davvero grande. *Neto*, il mio ballerino, tu eri l'organizzatore delle serate, tu decidevi cosa si faceva, e in molti momenti sei stato indispensabile. *Sergio*, dalle mille promesse e buoni propositi, mi hai fatto conoscere tutta la tua famiglia, accolto a braccia aperte, trattato come un fratello; per non parlare della quantità di *fiesta* che eri in grado di fare e l'emozione che ci mettevì, non me lo scorderò mai, grazie di tutto. *Diane*, tu mi hai dato accesso a *Casa 7*, e se non l'avessi fatto non sarebbe accaduto nulla, non ho parole.

Infine, *MFM*, il gruppo più bello in cui potessi capitare, con voi le notti non sono state così

pesanti, a parte qualche atelier. *Matteo*, sei una persona magnifica, mentre scrivo ho dei flashback del primo anno, e un sorriso mi si disegna in volto. Sono felice di non essermi sbagliato su te: intelligente, simpatico e stimolante. Con te l'architettura ha preso sfumature che non avrei mai raggiunto da solo. Se dovessi descriverti con tre parole, a cinque anni di distanza tu per me saresti: *lu sule, lu mare e lu ientu*. Perché mi illumini, mi tranquillizzi e mi fai volare su di quest'arte eterea che per noi è l'Architettura. *Fede*, grazie per avermi sempre spronato a fare meglio anche quando io avevo perso le speranze, per avermi costretto a crescere e a maturare idee e per credere costantemente in me. Senza te, sarebbe mancato un ingranaggio, oltre che una sonante risata.

Infine, voglio chiedere scusa a *tutti* per le troppe volte che sono distratto e dovette ripetermi mille volte le cose, oppure quando mi invento eventi che non sono successi e vi faccio perdere tempo a convincermi che non sia accaduto nulla, non è colpa mia, vivo un po' nel mio Mondo. Vorrei avervi dato molto di più, per ricambiare il favore, perchè voi mi date tanto, perchè siete tutti importanti e perchè fate parte di me. Voi avete reso tutto questo possibile.

E voglio ancora augurarvi di realizzare sempre i vostri sogni, ambiziosi o modesti che siano, l'importante è che per voi siano importanti. Ricordandovi le prime righe che ho scritto: *"Nei sogni comincia la responsabilità"*.

Mattia

C/S/E

calcoli / schede / elaborati

- C1** - Calcoli per il ribaltamento
composto di parete
- C2** - Calcoli per la flessione orizzontale
di parete

- S1** - ECOVERNET J500 XL
- S2** - TENAX GIGAN
- S3** - TENAX LABOR
- S4** - TENAX 3d GRID

- E1** - Inquadramento territoriale
Messico
- E2** - Inquadramento territoriale
Ixcamilpa de Guerrero
- E3** - Inquadramento territoriale
El Organal
- E4** - Pianta delle Coperture _ Ante
progetto
- E5** - Pianta delle Coperture _ Post
progetto
- E6** - Pianta pian terreno _ Ante
progetto
- E7** - Pianta pian terreno _ Post
progetto
- E8** - Sezione AA _ Post
progetto
- E9** - Sezione BB _ Post
progetto
- E10** - Prospetto Sud _ Post
progetto
- E11** - Prospetto Est _ Post
progetto
- E12** - Prospetto Nord _ Post
progetto

P = peso della parete che subisce il ribaltamento

P_c = peso dei cunei ribaltanti

q_c = peso della copertura per m lineare

q_L = resistenza a trazione longitudinale della maglia strutturale per m lineare

q_T = resistenza a trazione trasversale della maglia strutturale per m lineare

Q_c = carico concentrato del tetto

Q_L = carico concentrato longitudinale della maglia

Q_T = carico concentrato trasversale della maglia

$\alpha_{o,o}$ = coefficiente di ribaltamento della parete senza l'ausilio della maglia strutturale con momento di rotazione a quota 0 (al piede)

$\alpha_{o,1}$ = coefficiente di ribaltamento della parete con l'ausilio della maglia strutturale con momento di rotazione a quota 0 (al piede)

$\alpha_{1,7,0}$ = coefficiente di ribaltamento della parete senza l'ausilio della maglia strutturale con momento di rotazione a quota 1,7 m

$\alpha_{1,7,1}$ = coefficiente di ribaltamento della parete con l'ausilio della maglia strutturale con momento di rotazione a quota 1,7 m

Calcolo dell' $\alpha_{o,o}$

Prima di tutto bisogna calcolare il peso di ogni singolo componente del sistema di equilibrio, considerando che:

- il peso specifico dell'adobe da noi considerato è pari a 1.667 daN/m^3 (*Achenza, M., Sanna, U. 2009*)

- il peso della copertura lignea del edificio in esame la quale comprende: una trave lignea dalle dimensioni di $24 \times 16 \text{ cm}$, canne di tenochle (per analogia nel calcolo è stato preso il peso

del bambù), malta in terra e tegole in argilla³⁷. Con un peso complessivo pari a 160 daN/m

Con questi primi dati si potrà ricavare il peso dei carichi che serviranno durante la prima fase di calcolo. Per il nostro sistema otteniamo quindi:

$$P = 1.667 * 4 * 2,7 * 0,25 = 4.501 \text{ daN}$$

$$P_c = 1.667 * [(1,5 * 2,7) / 2] * 0,25 = 843 \text{ daN}$$

$$Q_c = 160 * 1,5 = 238 \text{ daN}$$

Si procede al calcolo del sistema d'equilibrio posizionandosi nell'estremo dove avviene il meccanismo di collasso, ovvero in A. È opportuno ricordarsi che durante il calcolo del momento ribaltante i bracci con senso orario daranno momenti positivi; mentre nel momento stabilizzante la condizione sarà esattamente l'inverso.

Si procede calcolando il M_{rib} :

$$M_{rib} = \alpha \left(2 P_c \frac{2h}{3} + P \frac{h}{2} + 2 Q_c h \right)$$

$$M_{rib} = \alpha (10.396) \text{ daN/m}$$

Il momento stabilizzante sarà dato dalla seguente formula:

$$M_{stab} = 2 P_c \left(b + \frac{a}{3} \right) + P \frac{b}{2} + 2 Q_c \left(\frac{b+a}{2} \right)$$

$$M_{stab} = 2.303 \text{ daN/m}$$

È importante ricordarsi di raddoppiare il peso dei cunei e della copertura perché i due cunei collaborano alla stabilità della struttura.

Si può calcolare ora $\alpha_{0,0}$:

$$\alpha_{0,0} = \frac{2303}{10396} = 0,22$$

³⁷ Andreolli, M., Tommasi, R. (2009) 'Esempio di dimensionamento di una copertura in legno'. Disponibile al seguente link: <http://risponde.promolegno.com/uploads/media/Esempio-di-dimensionamento-di-una-copertura-lignea.pdf>.

Calcolo dell' $\alpha_{0,1}$

Si procede ora al calcolo della $\alpha_{0,1}$ il quale prevede l'inserimento della maglia strutturale la quale darà un contributo stabilizzante, sia longitudinalmente che trasversalmente, al muro che subisce il ribaltamento.

Nel caso della Juta da noi utilizzata si sa che:

$$q_L = 1.000 \text{ daN/m}$$

$$q_T = 800 \text{ daN/m}$$

dai quali si può ricavare facilmente

$$Q_L = 1.000 * 2,7 = 2.700 \text{ daN}$$

$$Q_T = 800 * 1,5 = 1.200 \text{ daN}$$

Non si sono aggiunte forze che contribuiscono al ribaltamento della parete, quindi M_{Rib} avrà lo stesso valore del precedente:

$$M_{rib} = \alpha (10.396) \text{ daN/m}$$

Nel calcolo del momento stabilizzante vengono invece inserite le forze Q_L e Q_T :

$$M_{stab} = 2 P_c \left(b + \frac{a}{3} \right) + P \frac{b}{2} + 2 Q_c \left(\frac{b+a}{2} \right) + 4 Q_T \left(b + \frac{a}{2} \right) + 4 Q_L \frac{h}{2}$$

$$M_{stab} = 21.683 \text{ daN/m}$$

Anche in questo caso bisogna ricordarsi di quadruplicare il valore di Q_L e Q_T poiché la maglia viene posta sulle quattro facce delle pareti che ospitano i cunei di ribaltamento.

Si può ora effettuare il calcolo della $\alpha_{0,1}$:

$$\alpha_{0,1} = \frac{21683}{10396} = \mathbf{2,08}$$

Come si può notare il coefficiente di collasso è aumentato sensibilmente, segno che la maglia strutturale attua il suo lavoro stabilizzante e contenitivo degli sforzi sismici.

Calcolo dell' $\alpha_{1,7,0}$

Si sono effettuati gli stessi calcoli per il ribaltamento della parete ad un'altezza di 1,7 m dal livello del terreno.

Si ottengono quindi altri valori per le forze che entrano in azione nel nostro sistema:

$$P = 1.667 * 4 * 1 * 0,25 = 1.667 \text{ daN}$$

$$P_c = 1.667 * [(1 * 1) / 2] * 0,25 = 208 \text{ daN}$$

$$Q_c = 160 * 1 = 160 \text{ daN}$$

Da qui si ricavano i momenti e $\alpha_{1,7,0}$:

$$M_{rib} = \mathbf{\alpha (1.430) \text{ daN/m}}$$

$$M_{stab} = \mathbf{570 \text{ daN/m}}$$

$$\alpha_{1,7,0} = \mathbf{0,40}$$

Calcolo dell' $\alpha_{1,7,1}$

Allo stesso modo si procede con l'inserimento nel calcolo degli sforzi stabilizzanti della maglia strutturale.

$$Q_L = 1.000 * 1 = 1.000 \text{ daN}$$

$$Q_T = 800 * 1 = 800 \text{ daN}$$

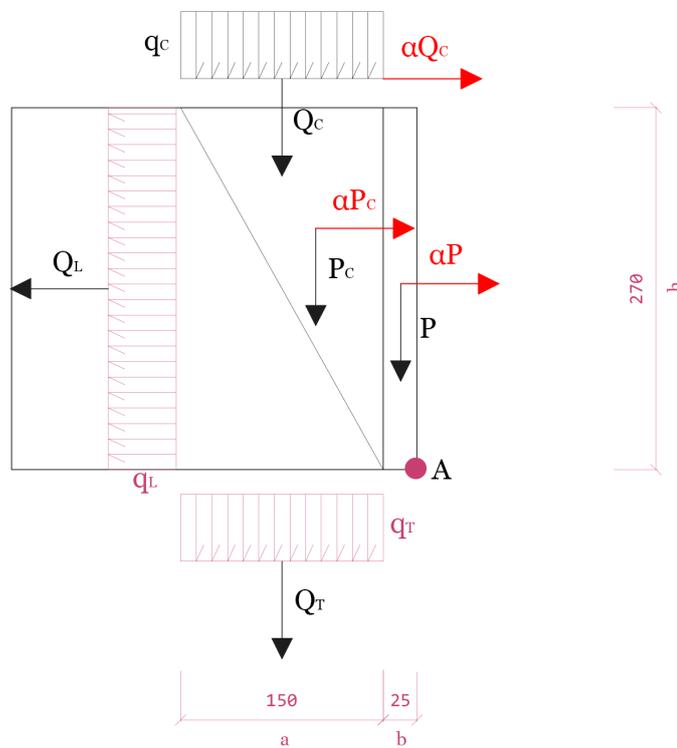
Si procede allo stesso modo al calcolo dei momenti e dell' $\alpha_{1,7,1}$:

$$\mathbf{M_{rib} = \alpha (1.430) daN/m}$$

$$\mathbf{M_{stab} = 4.970 daN/m}$$

$$\mathbf{\alpha_{1,7,0} = 3,47}$$

Anche in questo



W_1, W_2 = peso del cuneo che subisce il ribaltamento

R_1, R_2 = resistenza a trazione della maglia strutturale

v_1 = relativo spostamento per la forza W_1

v_2 = relativo spostamento per la forza W_2

Θ_1 = relativo allungamento per le forze R_1 e R_2

Θ_3 = relativo allungamento per le forze R_3 e R_4

Θ_5 = relativo allungamento per le forze R_5 e R_6

d = relativi allungamenti della maglia strutturale

λ = moltiplicatore di collasso

Il metodo in esame è stato risolto in maniera grafica per facilitarne la comprensione e il calcolo degli spostamenti, i quali sarebbero stati molto più complicati da risolvere analiticamente. Il procedimento grafico è stato spiegato nel paragrafo **4.3.2**.

$$W_1 = W_2 = 1.667 * [(1,75 * 2,7) / 2] * 0,25 = 984,6 \text{ daN}$$

$$R_1 = R_2 = 1.000 * 2,7 = 2.700 \text{ daN}$$

$$R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 800 * 1,75 = 1.440 \text{ daN}$$

Qui di seguito la formula utilizzata per calcolare il moltiplicatore di collasso:

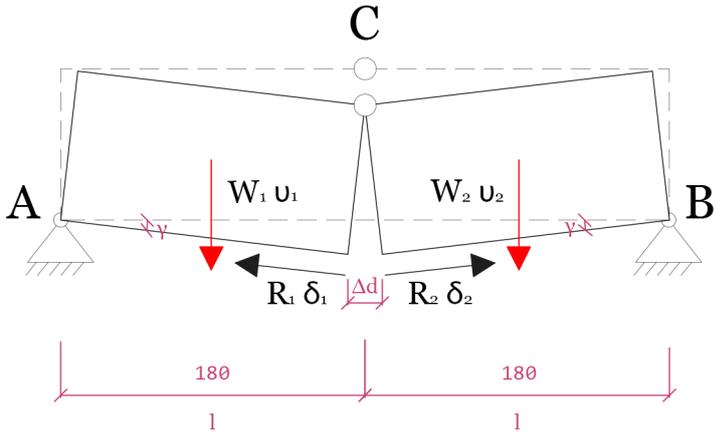
$$\lambda (W_1 v_1 + W_2 v_2) - R_1 \frac{\Theta_1}{2} - R_2 \frac{\Theta_1}{2} - R_3 \frac{\Theta_3}{2} - R_4 \frac{\Theta_3}{2} - R_5 \frac{\Theta_5}{2} - R_6 \frac{\Theta_5}{2} = 0$$

Che con le semplificazioni dovute all'uguaglianza di W_n e di R_n diventa:

$$\lambda = \frac{(R_1 \frac{\Theta_1}{2}) + (R_3 \Theta_3)}{(W_1 v_1)}$$

Dove il coefficiente di allungamento Θ_1 della maglia strutturale è preso pari alla metà del valore di Δd .

Si ottengono in questa maniera valori differenti di λ per ogni incremento dell'angolo γ .





ECOVERNET J500 XL

Anno di ultima revisione: **2014**

Funzione: **Controllo erosione**

STRUTTURA: Biorete antierosione realizzata in fibre naturali di juta tessute secondo direzioni ortogonali

PROPRIETA' FIBRE NATURALI

Materia prima (+ st. UV)	JUTA
--------------------------	-------------

PROPRIETA' DELLA BIORETE

Massa areica	g/m ²	500
N° fili ogni 10 cm (ordito/trama)		6,5/4,5
Dimensioni maglia MD/CMD	mm	15/20
Resistenza a trazione MD	kN/m	10
Allungamento a rottura MD	%	4,5
Resistenza a trazione CMD	kN/m	8
Allungamento a rottura CMD	%	4,5

Direzioni della prova: MD = longitudinale CMD = trasversale

CARATTERISTICHE DIMENSIONALI

Larghezza	m	2,42
Lunghezza	m	68,58
Imballo: balle costituite da 6 teli	m	1,3x0,65x0,55

Le fibre naturali sono soggette a decadimento e possono presentare variazioni, anche notevoli, dei valori sopra riportati. Tali variazioni possono dipendere non solamente da un processo produttivo non controllabile, ma anche da altri fattori quali lo stato di decomposizione biologica delle fibre e dalle condizioni ambientali (temperatura, umidità). I valori riportati in scheda tecnica si riferiscono alle condizioni di origine del prodotto



Le informazioni qui riportate sono basate sull'attuale nostro livello di conoscenza e produzione. Nuove ricerche e sviluppi sul prodotto potranno rendere necessarie ulteriori versioni. Per questo motivo ci riserviamo il diritto di aggiornare le schede tecniche senza preavviso. Le caratteristiche espresse si riferiscono alla produzione standard. Eventuali scostamenti o richieste di prodotti speciali, si intendono da concordare preventivamente.

TeMa Technologies and Materials srl

Via dell'Industria 21 - 31029 Vittorio V.to (TV) Tel. +39.0438.50.31 - Fax +39.0438.50.34.60 - e-mail: info@temacorporation.com - www.temacorporation.com

TENAX GIGAN

Rete estrusa in polietilene ad alta densità (HDPE) sottoposta in fase produttiva ad un processo di stiro in direzione longitudinale MD che conferisce elevata resistenza a trazione ed allungamento.

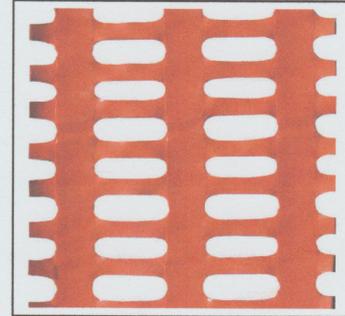


Immagine non in scala

CARATTERISTICHE FISICHE	METODI DI PROVA	UNITA'	GIGAN	NOTE
TIPO DI POLIMERO			HDPE	-
TIPO DI MAGLIA			OVOIDALE	-
COLORE			ARANCIO	-

CARATTERISTICHE DIMENSIONALI	METODI DI PROVA	UNITA'	GIGAN	NOTE
PASSO MD		mm	120.0	a
PASSO TD		mm	45.0	a
PESO UNITARIO		g/m ²	450.0	c
ALTEZZA ROTOLO		m	1.8	-
LUNGHEZZA ROTOLO		m	30.0	-
DIAMETRO ROTOLO		m	0.23	-
VOLUME ROTOLO		m ³	0.08	-
PESO ROTOLO		kg	24.5	c
IMBALLO INTERNO			SACCO PE	-
IMBALLO ESTERNO			-	-

CARATTERISTICHE TECNICHE	METODO DI PROVA	UNITA'	GIGAN	NOTE
RESISTENZA A TRAZIONE MD	METODO TX3	kN/m	16.0	a, b
ALLUNGAMENTO MD	METODO TX3	%	15.0	a, b

NOTE:

- a) MD: direzione macchina
TD: direzione trasversale
- b) TX3: 300 mm/min
- c) Tolleranza \pm 5%

I dati contenuti in questa scheda tecnica sono basati sulle conoscenze disponibili al momento della stampa e possono essere soggetti a modifiche dovute a cambiamenti nei metodi di prova e/o di fabbricazione. Tutte le dimensioni e le proprietà sono riportate come valori tipici. Le reti TENAX sono prodotti termoplastici soggetti a ritiro. MD: direzione longitudinale. TD: direzione trasversale.

GEN 035.6 - I - 03/17

TENAX

www.tenax.net

TENAX SpA
Via dell'Industria, 3
23897 Viganò (LC)
Tel. +39 039 9219300
Fax +39 039 9219290
customer.service@tenax.net



SGS ITALY Certificate n° IT193/0008.01
SGS U.K. Certificate n° IT193/2568.01



TENAX LABOR 100

Rete estrusa a maglia ovoidale in HDPE.

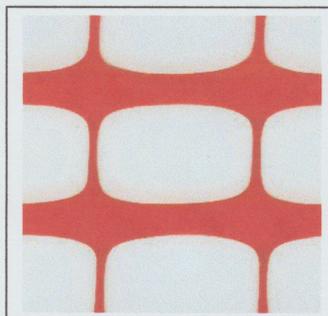


Immagine non in scala

CARATTERISTICHE FISICHE	METODI DI PROVA	UNITA'	LABOR	NOTE
TIPO DI POLIMERO			HDPE	-
TIPO DI MAGLIA			OVOIDALE	-
COLORE			ARANCIO	-

CARATTERISTICHE DIMENSIONALI	METODI DI PROVA	UNITA'	LABOR	NOTE	
PASSO MD		mm	70.0	a	
PASSO TD		mm	50.0	a	
PESO UNITARIO		g/m ²	100.0	c	
ALTEZZA ROTOLO		m	1.0	1.2	-
LUNGHEZZA ROTOLO		m	50.0	50.0	-
DIAMETRO ROTOLO		m	0.14	0.14	-
VOLUME ROTOLO		m ³	0.02	0.03	-
PESO ROTOLO		kg	5.2	6.2	c
IMBALLO INTERNO			SACCO PE	-	
IMBALLO ESTERNO			-	-	

CARATTERISTICHE TECNICHE	METODO DI PROVA	UNITA'	LABOR	NOTE
RESISTENZA A TRAZIONE MD	METODO TX3	kN/m	0.7	a, b
ALLUNGAMENTO MD	METODO TX3	%	7.0	a, b
RESISTENZA A TRAZIONE TD	METODO TX3	kN/m	0.5	a, b
ALLUNGAMENTO TD	METODO TX3	%	4.0	a, b

NOTE:

- a) MD: direzione macchina
TD: direzione trasversale
- b) TX3: 300 mm/min
- c) Tolleranza \pm 5%

I dati contenuti in questa scheda tecnica sono basati sulle conoscenze disponibili al momento della stampa e possono essere soggetti a modifiche dovute a cambiamenti nei metodi di prova e/o di fabbricazione. Tutte le dimensioni e le proprietà sono riportate come valori tipici. Le reti TENAX sono prodotti termoplastici soggetti a ritiro. MD: direzione longitudinale. TD: direzione trasversale.

GEN 774,2 - I - 03/17

TENAX

www.tenax.net

TENAX SpA
Via dell'Industria, 3
23897 Viganò (LC)
Tel. +39 039.9219300
Fax +39 039.9219290
customer.service@tenax.net



TENAX 3D Grid

Tipo: **S**
Geogriglie Biorientate



Le geogriglie TENAX 3D Grid S sono prodotte in polipropilene con un esclusivo sistema di estrusione e stiro biassiale e sono progettate specificamente per la stabilizzazione ed il rinforzo dei terreni.
L'esclusiva struttura tridimensionale (3D) delle geogriglie TENAX 3D Grid S consente un'ottimale interazione con il terreno, incrementando in maniera sostanziale il comportamento degli strati di materiale granulare nei quali sono inserite.
Le geogriglie TENAX 3D Grid S hanno un elevato modulo a trazione ed una eccellente resistenza al danneggiamento durante la posa in opera.

Applicazioni tipiche

Rinforzo di sottofondi stradali; riduzione dello spessore della ghiaia; ripartizione dei carichi statici e dinamici; stabilizzazione di rilevati; materassi antierosivi.

CARATTERISTICHE FISICHE	METODO DI PROVA	UNITA'	3D Grid S	NOTE
STRUTTURA			GEOGRIGLIE BIORIENTATE	
TIPO DI MAGLIA			APERTURE RETTANGOLARI	
COLORE STANDARD			NERO	
TIPO DI POLIMERO			POLIPROPILENE	
CARBON BLACK (Nerofumo)	ASTM D4218		2.0%	
IMBALLO	ISO 10320		BOBINE IN FILM DI POLIETILENE CON ETICHETTA	

CARATTERISTICHE DIMENSIONALI	METODO DI PROVA	UNITA'	3D Grid S		NOTE
			MD	TD	
APERTURA MAGLIA		mm	30	30	a,c,d
SPESSORE FILO		mm	4.0	1.5	a,c,e
SPESSORE NODO		mm	6.0		a
LARGHEZZA BOBINA		m	4.0		g
LUNGHEZZA BOBINA		m	50		

CARATTERISTICHE TECNICHE	METODO DI PROVA	UNITA'	3D Grid S		NOTE
			MD	TD	
RIGIDEZZA al 0.5% di ALLUNGAMENTO	ISO 10319	kN/m	550	350	a,b,c
RESISTENZA CHIMICA	EN 14030	%	100		a
RESISTENZA all' INVECCHIAMENTO	EN 12224	%	100		a
COEFFICIENTE di ATTRITO APPARENTE	EN 13738		1.25		a,f
TERRENO-GEOGRIGLIA ($\mu\text{s/gsy}$)					

NOTES:

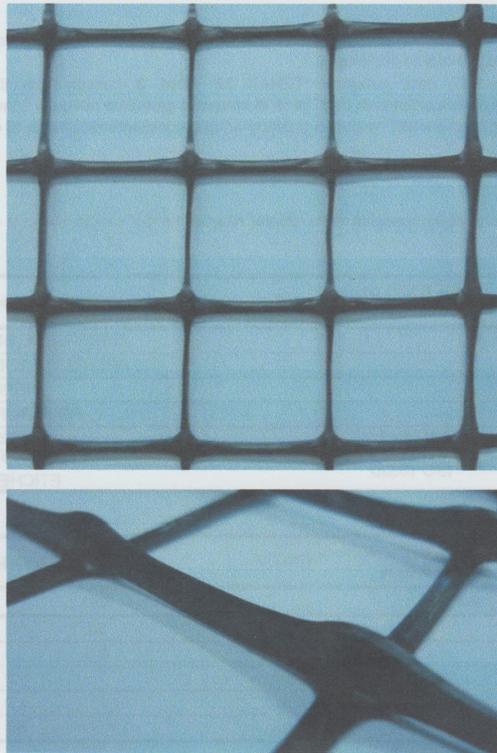
- Valori tipici
- Prove effettuate utilizzando estensimetri
- MD: longitudinalmente alla bobina; TD: trasversalmente alla bobina
- Tolleranza aperture: ± 5 mm
- Tolleranza spessore: - 5%
- Metodo di prova: EN 13738, Pressione 10 kPa, terreno: sabbia media uniforme
- Tolleranza: -2%

I dati tecnici sono soggetti a modifiche senza notifiche

TENAX

Caratteristiche Tipiche

TENAX 3D Grid S



Il Laboratorio TENAX è stato creato nel 1980 con lo scopo di assicurare lo sviluppo tecnico dei prodotti ed un accurato Controllo Qualità.

IL Laboratorio TENAX esegue prove meccaniche, idrauliche e di durabilità secondo le più importanti norme internazionali quali ISO, CEN, ASTM, DIN, BSI, UNI.

TENAX SpA
Geosynthetics Division
Via dell'Industria, 3
I-23897 Viganò (LC) ITALY
Tel. +39 039.9219307
Fax +39 039.9219200
e-mail: geo@tenax.net
Web Site: www.tenax.net





INQUADRAMENTO
MESSICO

0 100

500 km

IXCAMILPA

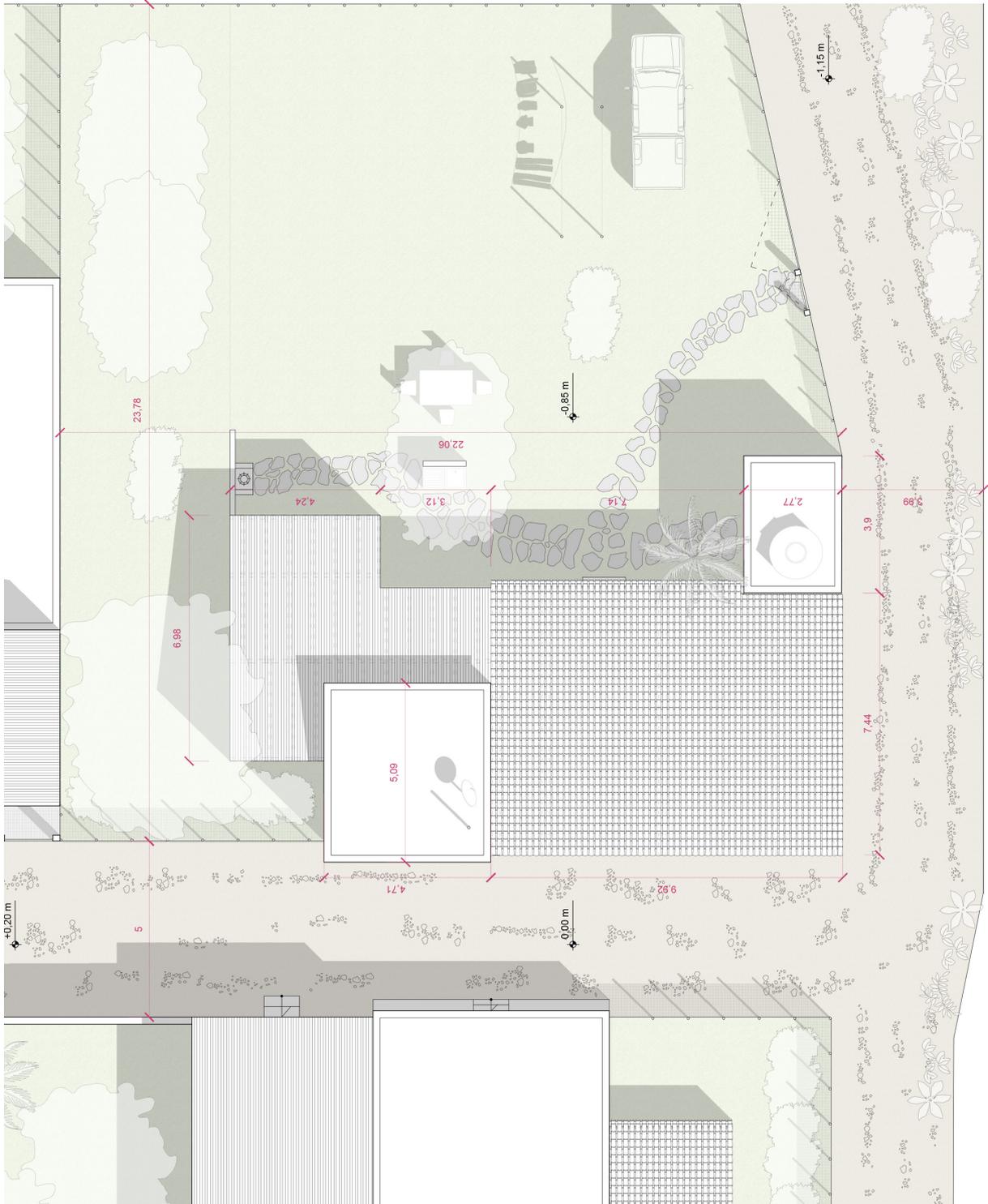




INQUADRAMENTO
EL ORGANAL

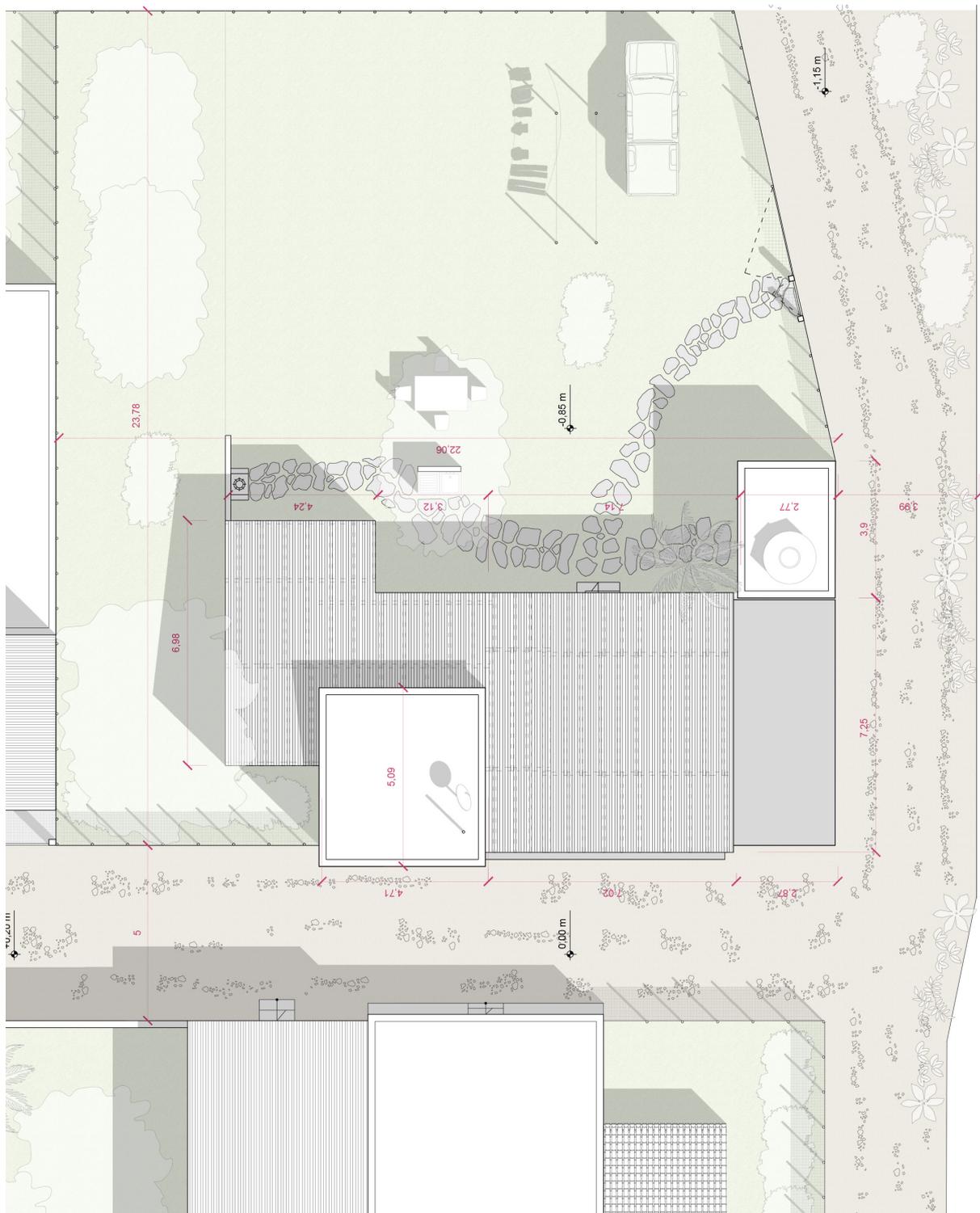
0 100 500 m





PIANTA DELLE COPERTURE
POST PROGETTO





**PIANTA DELLE COPERTURE
ANTE PROGETTO**

0 1 5 m 



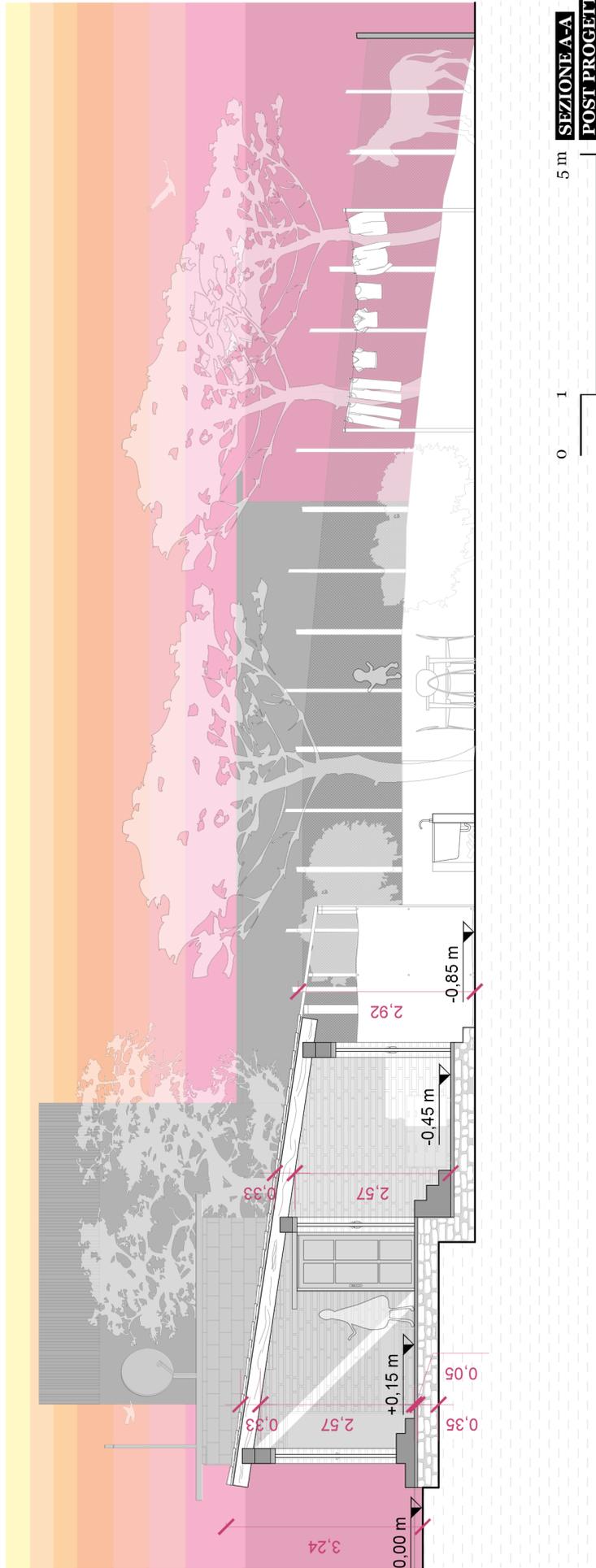
PIANTA PIAN TERRENO
ANTE PROGETTO

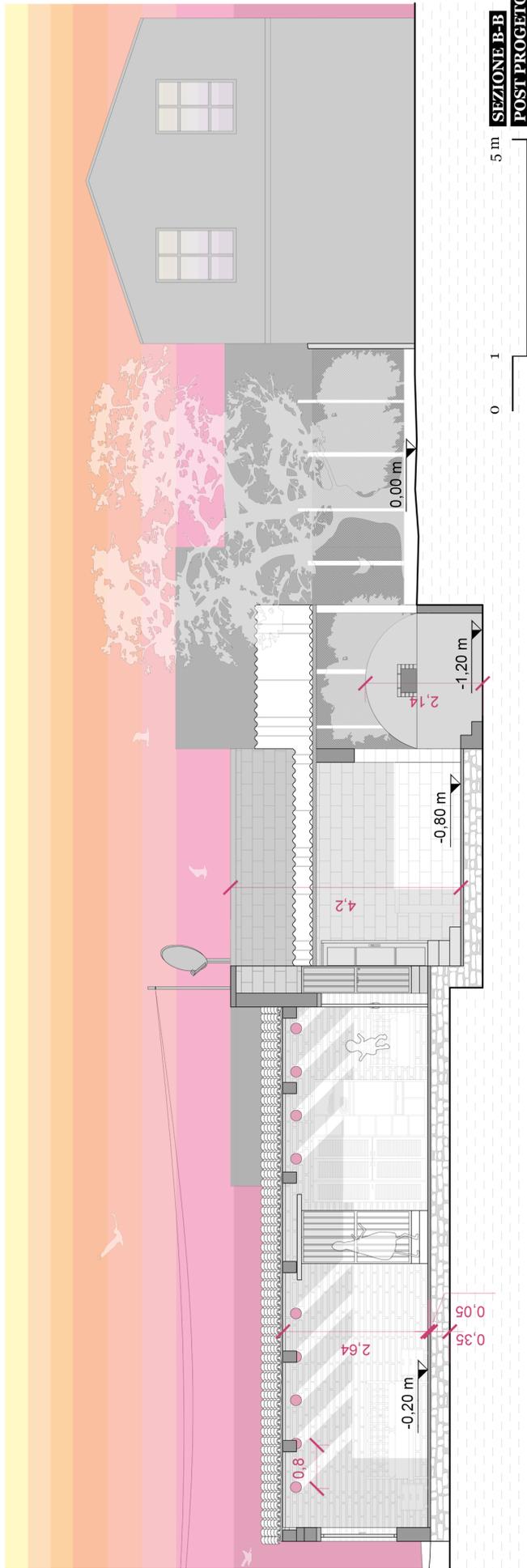
0 1 5 m N

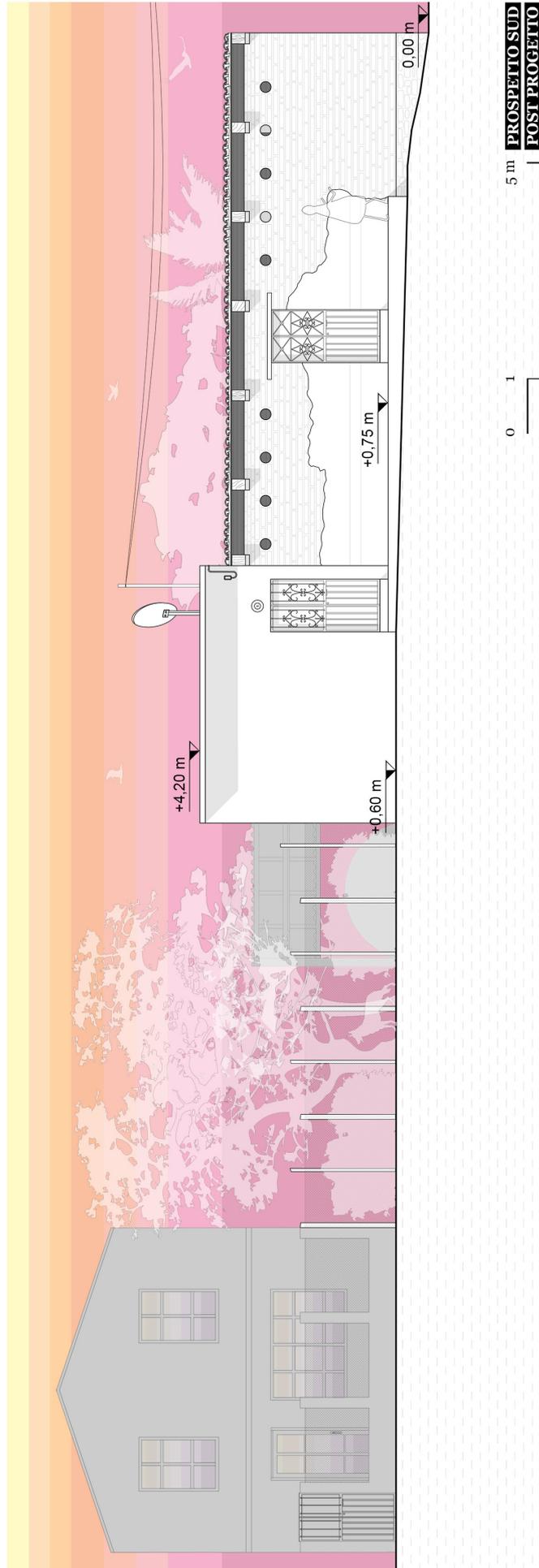


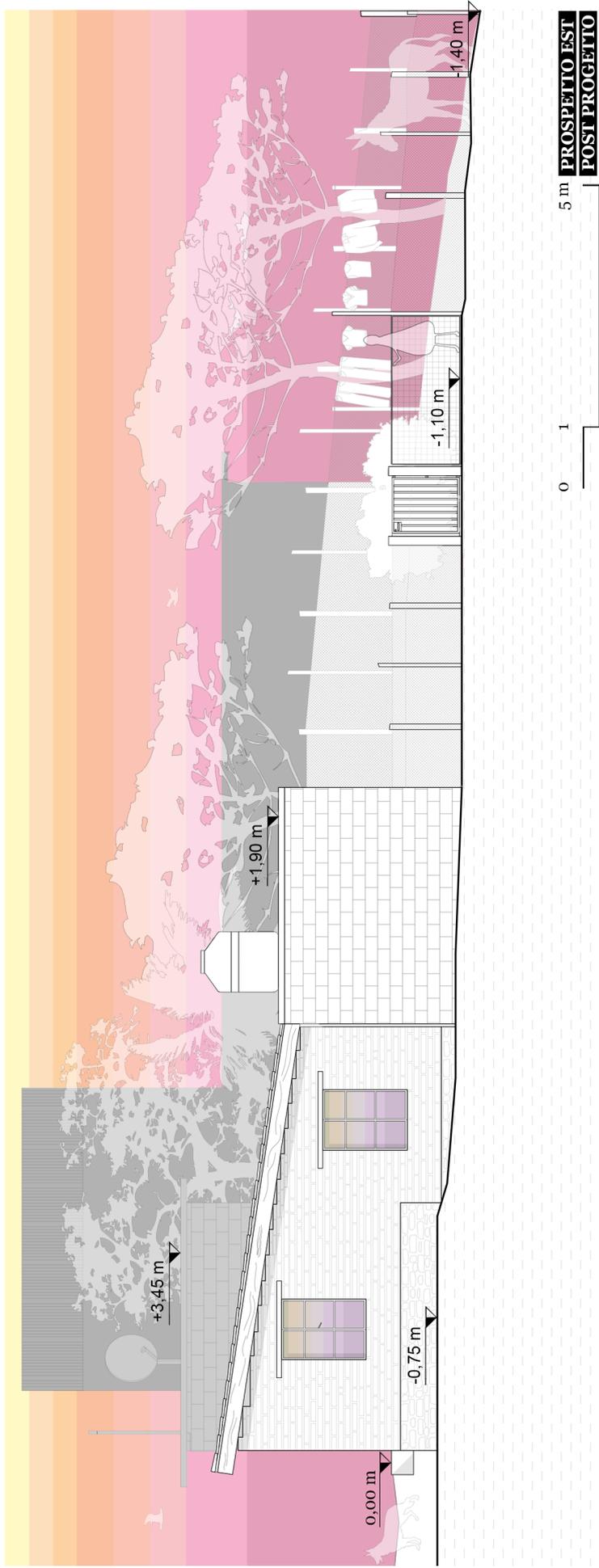
PIANTA PIAN TERRENO
POST PROGETTO

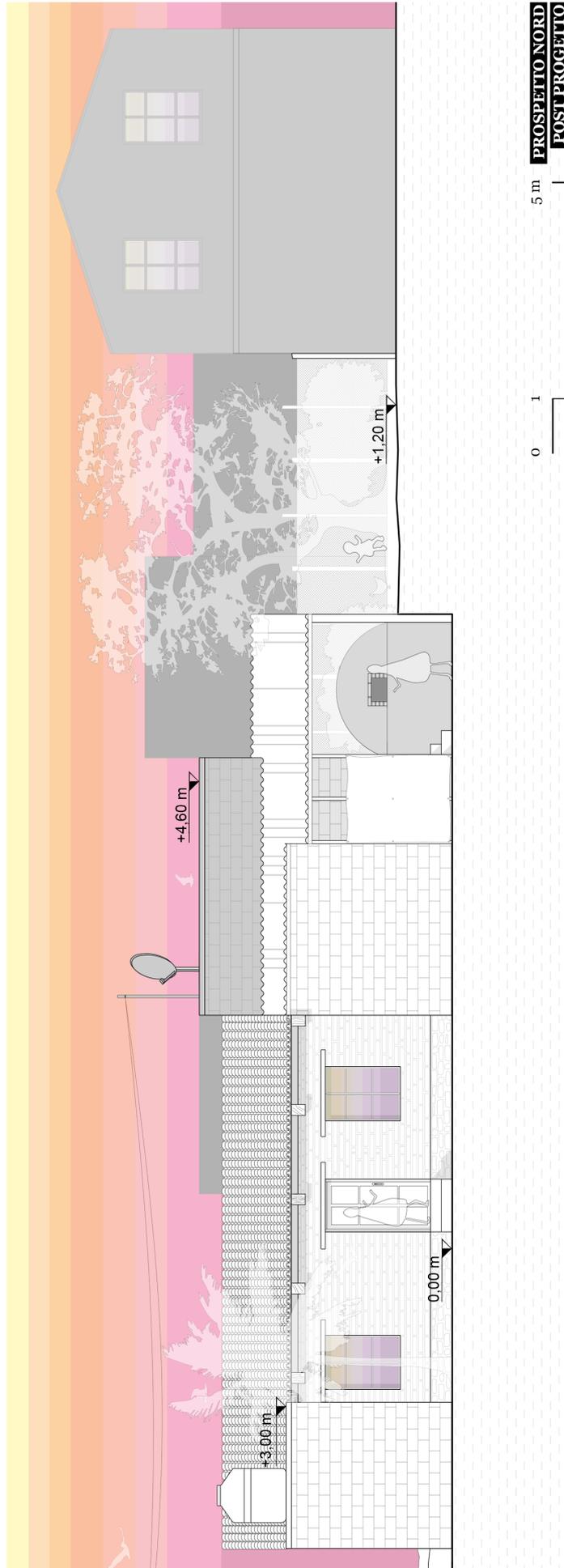












*“... E’ proprio un bel tipo, lei, sa? - disse.
- D’ora in poi lo vedrà fino alla nausea il
paesaggio sotto la neve, non aveva bisogno
di venire fin qua. Che stravaganza!*

Soffiando una nuvola di fiato bianco che
sembrava il getto di un motore a vapore, si
mise a guardare il cancello.

*- Ad ogni modo, è arrivato il momento giu-
sto, - proseguì.*

*- Provi a salire in cima a quella torre, ve-
drà qualcosa di interessante. Una primizia
dell’inverno. Fra poco suonerò il corno, lei
osservi bene quel che succede fuori.*

- Una primizia?

- Quando vedrà capirà.

Domandandomi di cosa stesse parlando
salii sugli spalti della torre più vicina al
cancello e contemplai il mondo esterno. Il
bosco di meli, sepolto sotto la neve, sem-
brava ammantato da una nube. La catena
settentrionale e quella orientale erano in
gran parte imbiancate, solo tratti di protu-
beranze rocciose spiccavano come le cic-
atrici di una ferita. Sotto la torre di guardia,
le bestie stavano dormendo secondo la loro
abitudine. Erano accovacciate per terra
con le zampe ripiegate sotto di sé, il corno
candido proteso in avanti, e si godevano
ognuna il proprio sonno. La neve che si era
accumulata sulla loro schiena non sembrava
disturbarle. Dovevano essere profondamen-
te addormentate.

Finalmente a poco a poco le nuvole sopra
la nostra testa cominciarono ad aprirsi, e

qualche raggio di sole illuminò il terreno. In piedi sugli spalti della torre, osservai il panorama, nella luce che filtrava a chiazze come quella di riflettori. Ero curioso di vedere quella cosa interessante cui aveva accennato il Guardiano.

Infine l'uomo aprì il cancello, e come ogni mattino diede fiato al corno: un suono breve, tre lunghi. Al primo richiamo le bestie si svegliarono, alzarono la testa e voltarono lo sguardo nella direzione da cui proveniva. Dalla quantità del loro fiato bianco si capiva che avevano cominciato una nuova giornata. Quando dormivano il loro respiro era lievissimo.

Appena l'ultimo richiamo sonoro venne assorbito dall'atmosfera, le bestie si alzarono. Diedero alcuni colpi di corno nell'aria, poi improvvisamente si scossero per far cadere la neve che avevano addosso, come se l'avessero notata solo allora. Si incamminarono verso il cancello.

Quando furono entrate tutte, ancora non riuscivo a capire cosa avesse voluto mostrarmi il Guardiano. Poi mi resi conto che alcune delle bestie che credevo addormentate erano morte, senza nemmeno cambiare posizione. Più che morte sembravano profondamente assortite in qualche grave pensiero. Però non potevano sentire il richiamo del corno. Dal loro naso e dalla bocca non usciva neanche un filo di fiato. Nel loro corpo la vita si era fermata, e la loro coscienza era stata risucchiata dalle tenebre profonde.

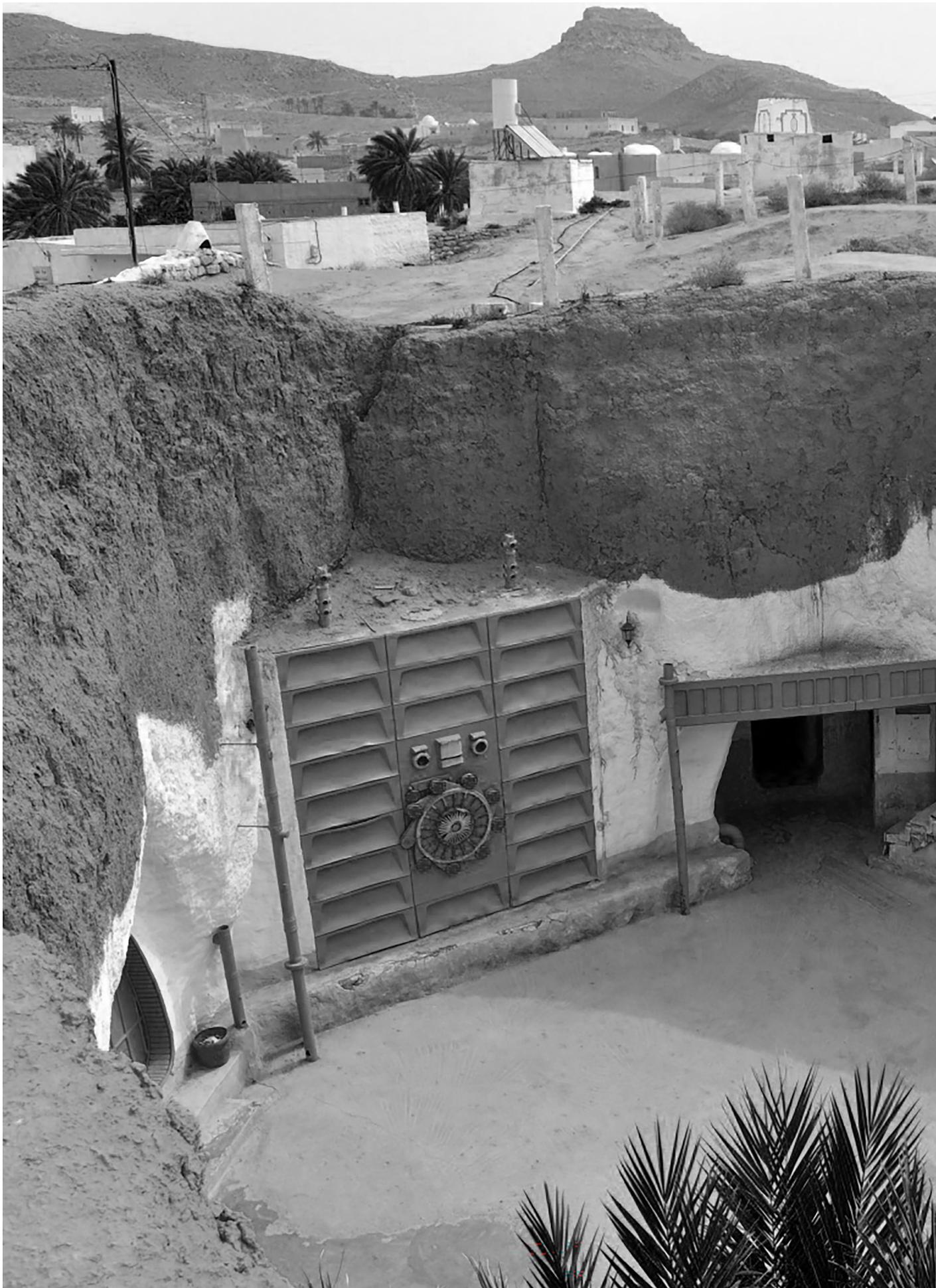
Tutte le bestie avevano ormai superato il cancello, sul terreno erano rimasti solo alcuni cadaveri, come piccoli tumuli nati spontaneamente. Avvolti nel sudario bianco della neve. Solo il corno si protendeva nell'aria, stranamente vivo. Le altre bestie, passando loro accanto, avevano abbassato completamente la testa, oppure raspatto leggermente il suolo con gli zoccoli. Piangevano la loro morte.

Mentre il sole del mattino saliva nel cielo e l'ombra della muraglia si allungava davanti a me, continuai a contemplare i cadaveri immobili, fino a quando il calore cominciò a sciogliere adagio la neve sul terreno. Avevo l'impressione che avrebbe finito per dissolvere anche la morte, che quelle bestie a un certo punto si sarebbero alzate e avrebbero iniziato come sempre la loro giornata.

Invece non si alzarono, soltanto il loro mantello, tutto bagnato ora che la neve si era sciolta, continuava a splendere al sole.

Alla fine gli occhi cominciarono a dolermi.”

H. Murakami



Il set scelto da George Lucas per Star Wars - Una Nuova Speranza.



Edificio scavato nella terra. Hotel Sidi Driss, Matomata, Tunisia. Foto di Uniq Hotel

