



Università degli Studi di Brescia

Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura,  
Territorio, Ambiente e di Matematica

QUADERNI DEL DOTTORATO

8

Ph.D. Thesis, Ph.D course in *Structural Engineering: Modelling, Preservation and Control of Materials and Structures*,  
University of Trento (at University of Brescia)

Supervisors:

Prof. E. P. Giuriani  
University of Brescia

Prof. G. A. Plizzari  
University of Brescia

Nicola Bettini  
Ph.D. in *Structural Engineering: Modelling, Preservation and Control of Materials and Structures*  
University of Brescia  
Via Branze 43, 25123  
Brescia (Italy)

[nicola.bettini@unibs.it](mailto:nicola.bettini@unibs.it)  
[ing.nicola.bettini@gmail.com](mailto:ing.nicola.bettini@gmail.com)

Nicola Bettini

**Il ritorno della terra cruda per l'edilizia sostenibile:  
la duttilità dei tamponamenti  
negli edifici soggetti a sisma**



Copyright © MMXIV  
ARACNE editrice S.r.l.

[www.aracneeditrice.it](http://www.aracneeditrice.it)  
[info@aracneeditrice.it](mailto:info@aracneeditrice.it)

via Raffaele Garofalo, 133/A-B  
00173 Roma  
(06) 93781065

ISBN 978-88-548-7006-2

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,  
di riproduzione e di adattamento anche parziale,  
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie  
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: giugno 2014

## Sommario

Everything should be made as simple as possible, but not simpler.

---

Albert Einstein

La problematica dell'interazione tra telai e tamponamenti per strutture site in zona sismica è di grande attualità per le notevoli implicazioni di sicurezza che ne derivano. Se da un lato i tamponamenti, ritenuti elementi non strutturali - ma di fatto lo sono a tutti gli effetti - garantiscono spesso il soddisfacimento delle richieste sismiche in edifici di vecchia concezione, altrettanto spesso sono causa di comportamenti non adeguati e talvolta particolarmente pericolosi anche in costruzioni recenti.

La presenza di tamponamenti, rigidi e fragili se realizzati secondo la tecnica attualmente più diffusa in Italia, modifica sostanzialmente la risposta sismica delle strutture, andando ad invalidare gran parte delle ipotesi progettuali normalmente adottate. Immaginare edifici senza tamponamenti è tuttavia impossibile per le necessità, sempre più stringenti, di limitazione dei costi di climatizzazione per il settore residenziale.

Al fine di conciliare queste esigenze contrastanti, nel corso della tesi si è valutata la possibilità di realizzare tamponamenti deformabili e duttili, in grado di assecondare le richieste di spostamento delle strutture progettate secondo i più recenti criteri di costruzione in zona sismica, scegliendo la debolezza

meccanica come idea di base, ottenuta grazie ad una tecnica costruttiva di semplice applicazione e ad una scelta attenta dei materiali.

L'obiettivo di forzare un quadro di danno progettabile e compatibile con esigenze di riutilizzo dei tamponamenti, andando a privilegiare comportamenti duttili a scapito di meccanismi fragili, è stato perseguito attraverso l'inserimento di linee di debolezza fisicamente connotate, in grado di interrompere la continuità dei pannelli, lungo cui si potesse manifestare scorrimento attritivo (duatile e stabile).

Particolare attenzione è stata dedicata al possibile utilizzo della terra cruda, con finalità deliberatamente strutturali, per poterne sfruttare le caratteristiche meccaniche, ritenute insufficienti o scadenti per altre applicazioni. Aspetti legati alla sostenibilità o alle prestazioni termoisolometriche sono passati in secondo piano rispetto a cedevolezza e debolezza.

La fattibilità dell'idea è stata indagata in fase iniziale attraverso lo studio del comportamento a taglio di giunti di muratura realizzata con mattoni di terra cruda. Successivamente, il campo di indagine è stato ampliato a quattro soluzioni di tamponamento di un portale in acciaio in scala reale, costruite secondo tecnica tradizionale e con partizioni interne, in terra cruda o laterizio forato.

I risultati sperimentali sono stati estesi per via numerica - attraverso due tecniche di modellazione - a condizioni e geometria differenti da quelle indagate in precedenza, per comprendere quanto bene parametri calibrati localmente potessero predire la risposta globale e le eventuali semplificazioni ottenibili dalla partizione dei pannelli.

Infine, è stato valutato il possibile utilizzo di tamponamenti in terra cruda con partizioni per strutture in legno a nodi duttili, ritenute un *target* ideale per vari aspetti, tra cui la compatibilità dei materiali, la possibilità fisica di garantire inerzia termica e quella meccanica di fornire rigidità e potenziale dissipazione di energia sismica.

## Summary

The interaction between frames and infills in case of earthquake is a topic of great significance in structural engineering. Infills, often considered non-structural elements, in fact behave as they were. Sometimes they make *low engineering* buildings behave better than one would expect, other times they are responsible of rather bad seismic performances even in recently built constructions.

Infills, often stiff and brittle if constructed with common fired bricks and strong mortar, are able to change to a great extent the seismic structural response, invalidating many of the basic design assumptions.

Nevertheless, it is not possible to think of buildings without infills, due to the requirement of controlling energy consumption for residential climate control.

To overcome this problem, the possibility of assembly ductile infills was investigated in the current thesis. The basic idea was to use weakness as the main tool, pursued both through the choice of materials and the proposal of a new, simple though effective building technique.

Particular attention was devoted to *adobe* (earthen bricks) infills, specifically chosen in a structural perspective to take advantage of the intrinsic weakness, often unacceptable for other applications.

Sustainability and thermo-hygrometric performances are considered important characteristics, even though background themes in comparison with weakness, according to the main perspective of this research work.

The aim of the research was to evaluate the possibility of forcing a predefined damage pattern, consistent with reuse requirements, by means of ductile mechanisms. The *modus operandi* was to lay weak (horizontal) surfaces in the panels, breaking their continuity to allow a frictional, stable and ductile sliding to take place.

The idea was investigated both numerically and experimentally. During a first phase, shear behavior of mud mortar joints was tested. Then, four full scale panels, confined by a steel frame, were subjected to lateral cyclic load. The four tests differed both in building technique, traditional or with internal partitions, and in material, hollow clay bricks or *adobes*.

The experimental work was then extended numerically by means of FE analysis (through two modeling techniques) to different geometrical and mechanical situations. Attention was focused on the role of partitions in the structural response and on the possibility of capturing global behavior through a local calibration (on small assemblies) of model parameters.

As a conclusion, the use of partitioned *adobe* infills was proposed in association with ductile timber frames because of the compatibility of materials. The solution may provide adequate stiffness and energy dissipation in case of earthquake. Moreover, this kind of buildings usually suffer for a lack of summer thermal insulation: the addition of mud infilling would improve such a performance.



## Ringraziamenti

Un sentito ringraziamento, va alla Confartigianato di Brescia, che ha sostenuto quella che potrebbe essere definita una “ricerca di base”, ed ha permesso una gestione libera della stessa.

Un grazie ai tutor prof. E. P. Giuriani e G. A. Plizzari, perchè preziose guide e punti di riferimento sicuri anche in un ambito poco battuto dalla ricerca.

Un pensiero grato a tutti i ricercatori del gruppo di tecnica delle costruzioni del DICATA per il sostegno e la collaborazione nello svolgimento della tesi, Ingg. A. Marini, G. Metelli, F. Minelli e M. Preti. Oltre a loro vorrei ricordare il prof. Riva e l'ing. Mazzù.

Un abbraccio forte ai colleghi ed amici che hanno condiviso tensioni e riflessioni, pause, inquietudini e gioia e molto altro: gli ingg. Sala, Cominoli, Tiberti e Germano, Nannei, Belleri, Zanotti, Cadei e Tomasoni.

Non è possibile dimenticare tutti i tecnici del Laboratorio di prove dei Materiali P. Pisa. Un grazie particolare ai sigg. Martinelli, Fiorillo, Caravaggi e Botturi.

Grazie anche a tutti i ragazzi che, oggi ingegneri, mi hanno accompagnato in questo cammino: Bellini, Brocchetti, Capuzzi, Guarisco, Mezzana, Monteverdi, Salvadori e Talom.

Alla mia famiglia va una dedica particolare perchè non ha mai smesso di credere in me, di mostrarmi un grande affetto, e mi ha assecondato in una scelta non facile: a mamma, papà, Silvia, Marco, Sara e... Toby.

Infine, un grazie di cuore per il sostegno nei momenti più bui, quando lo sconforto sembrava aver preso il sopravvento, a Elisa, perchè mi ha sempre dato la forza di continuare fino alla fine.

A grateful thank to Prof. Langenbach, because of his “dialectic” approach.

<b>Sommario</b>	<b>I</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2 Stato dell'arte</b>	<b>7</b>
2.1 Tecniche costruttive “antisismiche” storiche . . . . .	9
2.1.1 Panoramica generale . . . . .	9
2.1.1.1 Tecniche costruttive in Portogallo . . . . .	9
2.1.1.2 La <i>casa baraccata</i> in Italia. . . . .	11
2.1.1.3 Tecniche costruttive in Turchia . . . . .	12
2.1.1.4 Il <i>Fachwerk</i> e la <i>Log house</i> . . . . .	15
2.1.1.5 Tecnica costruttiva dell'isola di Lefkas, Grecia	16
2.1.1.6 Tecniche costruttive in Kashmir . . . . .	18
2.1.1.7 Tecniche costruttive nel Centro e Sud America	19
2.1.1.8 Il <i>Chicago Frame</i> in USA . . . . .	21
2.1.2 Sperimentazioni recenti su tecniche costruttive tradizionali	22
2.2 Interazione telai tamponamenti . . . . .	27
2.2.1 Aspetti pratici e progettuali . . . . .	28
2.2.2 Studio dell'interazione telaio-tamponamento . . . . .	36
2.2.2.1 Evidenze sperimentali . . . . .	37
2.2.2.2 Evidenze numeriche . . . . .	56
2.2.2.3 Influenza delle aperture sull'interazione nel piano	62

2.2.2.4	Interazione fuori piano . . . . .	66
2.2.3	Modellazione dell'interazione telaio-tamponamento alla macroscala . . . . .	67
2.2.3.1	Trattazione analitica di base - modelli semplici	68
2.2.3.2	Trattazione analitica avanzata - modelli evolutivi	74
2.2.4	Metodi di progettazione agli spostamenti . . . . .	78
2.2.4.1	<i>Direct Displacement Based Design</i> . . . . .	79
2.2.4.2	Applicazione <i>DBD</i> a strutture tamponate . . .	81
2.3	Comportamento murature . . . . .	83
2.3.1	Comportamento globale e locale . . . . .	83
2.3.1.1	Comportamento a taglio in piano . . . . .	84
2.3.1.2	Comportamento in compressione . . . . .	87
2.3.1.3	Comportamento a trazione . . . . .	90
2.3.1.4	Comportamento a taglio di giunti . . . . .	91
2.3.2	Modellazione EF della muratura . . . . .	99
2.3.2.1	Modelli alla microscala semplificata . . . . .	99
2.3.2.2	Modelli continui alla macroscala . . . . .	104
2.4	La terra cruda: materiale da costruzione . . . . .	108
2.4.1	Tecniche costruttive in terra cruda . . . . .	111
2.4.2	La terra cruda: storia, architettura e trattatistica . . . .	112
2.4.3	Proprietà meccaniche del materiale terra cruda . . . . .	120
2.4.3.1	Proprietà meccaniche della terra cruda naturale	121
2.4.3.2	Proprietà meccaniche della terra cruda stabi- lizzata . . . . .	123
2.4.3.3	Proprietà meccaniche della terra cruda con rin- forzo fibroso . . . . .	126
2.4.3.4	Proprietà meccaniche della terra cruda stabi- lizzata e con rinforzo fibroso . . . . .	127
2.4.4	Proprietà meccaniche di assemblaggi in terra cruda . . .	129
2.4.5	Comportamento sismico costruzioni in terra cruda . . .	131
<b>3</b>	<b>Caratterizzazione materiale ed assemblaggi in terra cruda</b>	<b>133</b>
3.1	Prove di compressione e trazione sui materiali . . . . .	134
3.1.1	Malte di terra cruda . . . . .	135
3.1.1.1	Prove di flessione . . . . .	136

3.1.1.2	Prove di compressione . . . . .	138
3.1.2	Mattoni in terra cruda . . . . .	140
3.1.2.1	Prove di flessione . . . . .	141
3.1.2.2	Prove di compressione . . . . .	142
3.2	Prove di compressione su assemblaggi di muratura . . . . .	144
3.2.1	Geometria provini, strumentazione, modalità di prova .	145
3.2.2	Compressione perpendicolare ai letti di malta; mattoni CNLM . . . . .	147
3.2.3	Compressione parallela ai letti di malta; mattoni CNLM	152
3.2.4	Compressione perpendicolare ai letti di malta; mattoni CLM . . . . .	156
3.3	Resistenza a taglio di giunti . . . . .	156
3.3.1	Descrizione banco di prova e <i>test setup</i> . . . . .	159
3.3.1.1	Applicazione azione tagliante . . . . .	160
3.3.1.2	Applicazione precompressione . . . . .	162
3.3.2	Prove a taglio . . . . .	162
3.3.2.1	Prove preliminari monotone a dilatazione im- pedita . . . . .	162
3.3.2.2	Prove preliminari cicliche a dilatazione impedita	165
3.3.2.3	Prove preliminari cicliche a precompressione costante . . . . .	169
3.3.2.4	Prove cicliche con vincolo normale elastico . .	171
3.4	Riepilogo . . . . .	176
3.5	Conclusioni . . . . .	179
<b>4</b>	<b>Sperimentazione su tamponamenti in scala reale</b>	<b>181</b>
4.1	Presupposti teorici alla base del modello . . . . .	182
4.2	Descrizione campioni testati . . . . .	184
4.2.1	Telaio base . . . . .	185
4.2.2	Laterizio tradizionale . . . . .	186
4.2.3	Laterizio 2 partizioni . . . . .	187
4.2.4	Terra cruda tradizionale . . . . .	187
4.2.5	Terra cruda 3 partizioni . . . . .	188
4.3	Sistemi di contrasto, carico e strumentazione . . . . .	190
4.4	Risultati prove sperimentali . . . . .	194

4.4.1	Telaio nudo . . . . .	194
4.4.2	Laterizio tradizionale . . . . .	194
4.4.3	Laterizio 2 partizioni . . . . .	199
4.4.4	Terra cruda tradizionale . . . . .	202
4.4.5	Terra cruda 3 partizioni . . . . .	209
4.5	Confronto risultati . . . . .	213
4.6	Considerazioni tecniche sui tamponamenti in terra cruda . . . . .	216
4.7	Conclusioni . . . . .	217
<b>5</b>	<b>Simulazioni numeriche scala locale</b>	<b>219</b>
5.1	Modelli microscala semplificata . . . . .	221
5.1.1	Descrizione modello . . . . .	222
5.1.2	Considerazioni preliminari sulle analisi . . . . .	225
5.1.3	Confronto numerico-sperimentale per tamponamenti in terra cruda . . . . .	225
5.1.3.1	Tecnica costruttiva tradizionale . . . . .	225
5.1.3.2	Tecnica costruttiva con partizioni . . . . .	228
5.1.4	Estensione a tamponamenti in laterizio . . . . .	230
5.1.5	Considerazioni parziali . . . . .	234
5.2	Modelli macroscale locale . . . . .	236
5.2.1	Analisi materiali lineari . . . . .	237
5.2.1.1	Descrizione modello . . . . .	237
5.2.1.2	Effetto partizioni . . . . .	238
5.2.1.3	Influenza modulo elastico tamponamento . . . . .	240
5.2.1.4	Influenza altri parametri . . . . .	245
5.2.1.5	Considerazioni parziali . . . . .	245
5.2.2	Analisi materiali non-lineari . . . . .	247
5.2.2.1	Descrizione modello e materiali . . . . .	248
5.2.2.2	Validazione modello materiale . . . . .	250
5.2.2.3	Effetto presenza partizioni . . . . .	255
5.2.2.4	Effetto materiale resistente a trazione . . . . .	260
5.2.2.5	Considerazioni energetiche . . . . .	262
5.2.2.6	Influenza dilatanza . . . . .	264
5.2.2.7	Parametri essenziali per la definizione del ma- teriale . . . . .	264

5.2.2.8	Altri parametri del modello . . . . .	267
5.2.2.9	Effetto geometria e meccanica telaio . . . . .	270
5.3	Conclusioni . . . . .	272
<b>6</b>	<b>Simulazioni numeriche scala globale</b>	<b>277</b>
6.1	Modello e sollecitazioni . . . . .	279
6.1.1	Introduzione - caso esame . . . . .	279
6.1.2	Modellazione dei nodi con elementi ad inelasticità local- izzata . . . . .	281
6.1.3	Modellazione isteretica tamponamenti . . . . .	283
6.1.4	Influenza aperture su curve di involuppo . . . . .	283
6.1.5	Descrizione sollecitazioni . . . . .	286
6.2	Risposta traslatoria - edificio regolare in pianta . . . . .	287
6.2.1	Risposta telaio nudo . . . . .	288
6.2.2	Irregolarità in elevazione da tamponamenti . . . . .	292
6.2.2.1	Effetto su richiesta di spostamento . . . . .	293
6.2.2.2	Effetto su richiesta di duttilità locale . . . . .	299
6.2.3	Effetto tamponamenti attraverso incremento di smorza- mento viscoso equivalente $\xi$ . . . . .	302
6.2.4	Intensità sismica e risposta strutturale di edificio tam- ponato . . . . .	305
6.2.4.1	Evento <i>LPR</i> . . . . .	305
6.2.4.2	Evento <i>ART1</i> . . . . .	310
6.2.5	Comportamento elastico non-lineare dei nodi . . . . .	312
6.2.6	Tamponamenti duttili in strutture irrigidite attraverso sistemi di controvento . . . . .	320
6.3	Risposta torsionale - edificio irregolare in pianta . . . . .	325
6.3.1	Considerazioni introduttive sul modello . . . . .	326
6.3.2	Risultati preliminari analisi modale . . . . .	327
6.3.3	Irregolarità in pianta da tamponamenti . . . . .	328
6.4	Conclusioni . . . . .	336
	<b>Conclusioni</b>	<b>341</b>

<b>A Esperienze sul materiale terra cruda in Paesi in Via di Sviluppo</b>	<b>347</b>
A.1 Introduzione al problema . . . . .	347
A.2 Caso studio 1 . . . . .	348
A.3 Caso studio 2 . . . . .	350
<b>B Comportamento energetico degli edifici</b>	<b>355</b>
B.1 Introduzione storica al problema energetico . . . . .	355
B.2 Storia delle normative energetiche in Italia . . . . .	356
B.2.1 Legge 615/66 . . . . .	356
B.2.2 Legge 373/76 . . . . .	357
B.2.3 Legge 10/91 e DM 27 luglio 2005 . . . . .	357
B.2.4 Decreto Legislativo 192/05 e Decreto Legislativo 311/06 . . . . .	357
B.3 Valutazione del comportamento energetico degli edifici . . . . .	359
B.3.1 Panorama europeo . . . . .	359
B.3.2 Panorama italiano . . . . .	362
B.4 Proprietà energetiche ed igrometriche della terra cruda . . . . .	369
B.5 Comfort abitativo di costruzioni in terra cruda . . . . .	373
<b>C Altri risultati analisi numeriche</b>	<b>375</b>
C.1 Analisi materiali lineari <i>Abaqus</i> . . . . .	375
C.2 Analisi materiali non-lineari <i>Abaqus</i> . . . . .	378
<b>D Calibrazione parametri materiali non-lineari DIANA</b>	<b>387</b>
D.1 Compressione perpendicolare e parallela ai letti di malta . . . . .	388
D.2 Comportamento a trazione muratura terra cruda . . . . .	389
D.3 Comportamento a taglio doppietti muratura terra cruda . . . . .	391
<b>Bibliografia</b>	<b>395</b>



## Introduzione

Un ubriaco, di notte, si mette a cercare una chiave sotto un lampione. Arriva un tale che lo aiuta ma, non trovando nulla, gli chiede se è proprio sicuro di aver perso lì la chiave. L'ubriaco risponde: no, non sono affatto sicuro, ma è qui che c'è luce.

---

Sono numerosi gli eventi catastrofici che vedono protagoniste strutture mal concepite e scuotono la coscienza collettiva, evidenziando ancora una volta la necessità di affinare gli strumenti di progettazione e di verifica disponibili.

Molte delle problematiche si manifestano in situazioni estreme di origine varia (sismi, cedimenti strutturali, eventi atmosferici di grande intensità, ecc.); l'impossibilità di prevedere con esattezza le caratteristiche delle specifiche sollecitazioni porta spesso a progetti non adeguati. Di fronte a situazioni non preventivabili, la risposta più naturale è quella di proporre duttilità e ridondanza strutturale come concetti alla base progettazione.

Il terremoto è - attualmente, nel contesto geografico italiano (e non solo) - l'evento che per ricorrenza e danni indotti mette più a dura prova il costruito in generale. Anche i sismi più recenti hanno mostrato come ci sia una discrepanza tra il comportamento strutturale ipotizzato e quello effettivamente esibito. Edifici concepiti per essere duttili si comportano talvolta in maniera

inspiegabilmente fragile. Parte della responsabilità di queste manifestazioni è da imputare ad una povertà di dettagli costruttivi e, talvolta, ad una scelta di materiali troppo “parsimoniosa”; tuttavia il ruolo dei tamponamenti è spesso centrale per spiegare *debacles* strutturali.

Se la parola d’ordine della progettazione sismica è duttilità, ottenibile grazie allo sfruttamento di meccanismi stabili e dissipativi (quali quelli plastici flessionali) ed all’inibizione di meccanismi fragili (criterio della gerarchia delle resistenze), la presenza di tamponamenti va ad alterare gli i cinematismi strutturali ipotizzati, con conseguenze anche gravissime (Figura 1.1).



Figura 1.1: Effetti del terremoto di Gölcük su strutture simili a telaio: nuda (sx) e tamponata (dx).

Molto spesso i tamponamenti, ritenuti (involontariamente) o considerati (deliberatamente) elementi non strutturali, vengono esclusi dalla progettazione sismica. Tuttavia, almeno nelle fasi iniziali di vibrazione, essi dominano il comportamento globale: l’edificio si comporta non come un telaio nudo, ma come una scatola, molto più rigida e talvolta irregolare del telaio, soggetta a sollecitazioni notevolmente superiori<sup>1</sup>, gran parte delle quali viene ad es-

<sup>1</sup>Soprattutto se il progetto sismico è allo Stato Limite Ultimo con spettro di risposta ridotto dal coefficiente di struttura.

sere incassata dai tamponamenti stessi (più rigidi degli elementi del telaio), generalmente fragili.

Una volta superata la propria capacità i tamponamenti perdono l'integrità secondo modi dipendenti dalle caratteristiche geometriche e meccaniche dei materiali costituenti, andando a pregiudicare lo sviluppo dei cinatismi globali ipotizzati in fase di progetto a causa della tendenza a localizzare la richiesta di deformazione su pochi elementi "sismoresistenti", spesso tutti allo stesso piano (meccanismo di piano debole).

Il problema di fondo dell'interazione nasce quindi dall'incompatibilità deformativa di telai e tamponamenti (anche in strutture a setti di controvento). Tale problematica è accentuata dall'uso di malte in cemento ad alta resistenza e di mattoni cotti forati, dal comportamento ortotropo/anisotropo, che nel complesso conferiscono al tamponamento un'elevata rigidezza, ma altrettanta fragilità con implicazioni di sicurezza e strutturali.

D'altro canto, i tamponamenti sono di fondamentale importanza nel caso di eventi sismici di intensità moderata, perchè proteggono gli elementi primari dal danneggiamento.

Se in teoria, per quel che concerne le richieste prettamente strutturali/sismiche, i tamponamenti dovrebbero e potrebbero essere eliminati<sup>2</sup>, le problematiche relative alla progettazione integrata con altre discipline, quali l'architettura e la fisica tecnica, ne rendono impossibile l'esclusione.

Stante il crescente peso delle implicazioni ecologiche sulla progettazione in termini di prestazioni termiche degli edifici, pensare di eliminare i tamponamenti è impossibile; soprattutto in climi caldi, dove l'inerzia termica gioca un ruolo centrale, un involucro spesso e massivo può portare benefici notevoli.

La diffusione su vasta scala di materiali resistenti a trazione, quali acciaio e *c.a.*, accompagnata da tendenze architettoniche "moderne", ha liberato la progettazione dai vincoli imposti dalle pesanti strutture murarie dei secoli passati, che tuttavia portavano in dote una elevata capacità di isolamento termico soprattutto nella stagione estiva.

---

<sup>2</sup>Il controllo dello spostamento operato dai tamponamenti per sollecitazioni compatibili con *SLD* è un contributo reale, ma se non viene considerato a livello normativo obbliga comunque a garantire il rispetto delle prescrizioni in merito attraverso gli elementi "strutturali".

Cercare di equilibrare queste esigenze contrastanti non è facile. Spesso è possibile rinunciare ad uno degli aspetti presentati, scegliendo un criterio “di sicurezza” più che economico, talvolta sulla scorta dell’emozione generata da eventi particolari: l’ideale di un edificio massivo nell’involucro, ma duttile strutturalmente, è l’obiettivo prefissato.

In questo senso può venire in aiuto la storia delle costruzioni, attraverso l’analisi di soluzioni semplici ma che hanno saputo resistere al banco di prova del tempo. Le tecniche “antisismiche” storiche, diffuse in tutto il mondo e nate spesso indipendentemente l’una dall’altra sulla base dell’esperienza diretta sul campo nella fase post-sismica, possono fornire una risposta al desiderio di conciliare massa e prestazione sismica. Il tratto comune di questi edifici sembra essere la volontà di dominare il panorama fessurativo attraverso una diffusa interruzione della continuità materica degli elementi strutturali secondari, i tamponamenti dell’ottica moderna.

L’idea che è stata esplorata nel corso del lavoro di ricerca è se sia possibile realizzare delle strutture tamponate “massivamente” con materiale a basso impatto ambientale globale, in grado al contempo di comportarsi adeguatamente nel corso di eventi sismici.

Con queste finalità si è deciso di sperimentare la terra cruda, intesa come materiale da utilizzare per la realizzazione di murature di tamponamento<sup>3</sup> di sistemi primari resistenti ai carichi verticali e laterali.

La scelta di associare la terra cruda a materiali da costruzione ritenuti più nobili cui demandare l’azione resistente primaria (acciaio, *c.a.*, legno), è dettata dalla debolezza meccanica del materiale che, di fatto, limiterebbe la possibile altezza di strutture in terra non stabilizzata<sup>4</sup> ad uno o due piani al massimo, per i quali la problematica sismica non è portata all’estremo.

Nell’ottica della sostenibilità, l’utilizzo di materiali naturali non trattati, quali la terra cruda, potrebbe configurarsi come una possibilità interessante.

La soluzione di tamponamento proposta potrebbe permettere l’omissione dei tamponamenti dalle analisi strutturali di edifici in acciaio o *c.a.*, giustificata

---

<sup>3</sup>Posta in opera attraverso una tecnica che trasformi queste pareti “non strutturali” in meccanismi dissipativi stabili.

<sup>4</sup>Intendendo con ciò terre crude non additivate da stabilizzanti chimici quale calce, gesso, cemento, per cui l’azione legante è affidata all’attrazione elettrostatica dei fillosilicati di argilla.

dal fatto che, effettivamente, l'interazione con la struttura è trascurabile da un punto di vista ingegneristico<sup>5</sup>.

Nel caso di strutture in legno, la terra cruda potrebbe essere il tamponamento ideale per l'incremento di rigidità e di potenziale dissipazione di energia sismica, nonché per la compatibilità igrometrica e meccanica con gli elementi strutturali primari.

La struttura della tesi segue un percorso concettuale che parte dalla conoscenza locale del comportamento della terra cruda fino ad arrivare alla configurazione di una possibile situazione strutturale, utilizzando sia strumenti numerici che sperimentali, cercando un appoggio nelle conoscenze generali reperibili in letteratura.

Il Capitolo 2 è quindi dedicato allo stato dell'arte, e tocca una ampia panoramica di argomenti di carattere architettonico, strutturale, numerico, storico, materico; la vasta prospettiva è finalizzata alla conoscenza di strumenti e tecniche di indagine consolidate in altri campi della tecnica delle costruzioni che possano essere adattati alla terra cruda.

Il Capitolo 3 è dedicato allo studio di piccoli assemblaggi in terra cruda, sottoposti a sollecitazioni semplici di taglio e compressione, principalmente per calibrare le caratteristiche meccaniche delle prove sperimentali su tamponamenti in scala reale ed i parametri di base per le analisi numeriche.

Il Capitolo 4 confronta i risultati sperimentali di quattro soluzioni di tamponamento differenti per materiali (laterizio tradizionale forato e terra cruda) e tecnica costruttiva (tamponamenti continui e partiti internamente), all'insegna della ricerca della debolezza strutturale come soluzione ottimale per pareti costruite in zona sismica.

Il Capitolo 5 amplia a condizioni geometriche e strutturali diverse i risultati ottenuti per soluzioni in terra cruda nei capitoli precedenti attraverso simulazioni numeriche, affrontate secondo due tecniche di modellazione differenti.

Il Capitolo 6 è invece dedicato alla simulazione del possibile effetto di un tamponamento in terra cruda sul comportamento strutturale di un edificio a telaio pesante in legno con plasticità concentrata nei nodi, particolarmente deformabile e termicamente poco adeguato a climi caldi.

---

<sup>5</sup>E si ignora comunque un meccanismo stabile e duttile, senza i rischi di localizzazione derivati dalla eventuale fragilità degli elementi.

L'Appendice *A* è dedicata allo studio della possibilità di stabilizzazione della terra cruda per l'utilizzo strutturale in Paesi in Via di Sviluppo, dove alle esigenze prettamente statiche si somma la necessità di protezione di fronte agli eventi meteorici.

L'Appendice *B* presenta una rapida contestualizzazione del problema energetico degli edifici.

Le Appendici *C* e *D* contengono materiale relativo alle analisi numeriche del Capitolo 5, omissa per questioni di leggibilità e di snellezza esplicativa.