



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI GUGLIELMO MARCONI**

FACOLTÀ DI SCIENZE E TECNOLOGIE APPLICATE

LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

STRUTTURE IN LEGNO PER LA RICOSTRUZIONE POST-SISMA DEI CENTRI  
STORICI: PROGETTO DI UNA SOLUZIONE INTEGRATA PER EDIFICI IN  
MURATURA

Relatore:  
Prof. **Ernesto Grande**

Candidato:  
**Matteo Bagnoli**  
Matr. N°: STA07224/LM23

Anno Accademico 2017/2018

Indice

**Introduzione ..... I**

**Indice ..... III**

**Capitolo 1 I terremoti reali e di progetto .....1**

1.1 Azioni dinamiche sulle strutture ..... 1

1.1.1 Tipologie di carichi dinamici ..... 2

1.1.2 Il carico dinamico non periodico: il terremoto ..... 2

1.1.3 La risposta strutturale..... 4

1.2 L'Oscillatore Semplice (SDOF) ..... 5

1.2.1 Le proprietà fisiche ..... 7

1.2.2 L'equazione del moto ..... 10

1.2.3 Oscillazioni libere con assenza di forzante esterna . 14

1.2.4 Oscillazioni libere smorzate ..... 16

1.2.5 Oscillazioni con forzante armonica ..... 19

1.2.6 Oscillazioni con forzante arbitraria ..... 22

1.2.7 Approccio energetico ..... 27

**Capitolo 2 Gli spettri di risposta e la legislazione italiana  
.....31**

2.1 Gli Spettri di Risposta ..... 31

2.1.1 Pseudo velocità, accelerazione, spostamento relativi  
spettrali ..... 34

2.2 Sismografi ed accelerogrammi ..... 38

2.2.1 Contenuto spettrale di un segnale sismico ..... 39

2.3 Spettri di Normativa .....	40
2.3.1 SdR elastico in accelerazione delle componenti orizzontali .....	43
2.3.2 SdR elastico in accelerazione delle componenti verticali .....	47
2.3.3 Osservazioni sugli Spettri di Risposta .....	48
2.4 Aspetti ingegneristici sisma de L'Aquila (6/4/2009) .....	50
2.4.1 Stazioni accelerometriche oggetto di analisi .....	51
2.4.2 Spettri di Risposta (Cy) elastici e anelastici.....	53
2.4.3 Spettri di Energia di Input ( $E_I$ ) elastici e anelastici .	58
2.4.4 Spettri di Spostamento elastici.....	62
2.4.5 Potenziale di danno del moto del suolo.....	64
2.5 Aspetti ingegneristici sisma di Amatrice/Accumoli (24/8/2016) .....	68
2.5.1 Stazioni accelerometriche oggetto di analisi .....	68
2.5.2 Spettri di Risposta .....	70
2.5.3 Spettri di Spostamento e isolamento sismico .....	71

### **Capitolo 3 Progettazione antisismica: strutture**

<b>Sismo-Resistenti .....</b>	<b>73</b>
3.1 Gerarchia delle Resistenze (GdR) .....	73
3.1.1 Materiale .....	76
3.1.2 Sezione.....	77
3.1.3 Elemento .....	79

3.1.4	Struttura .....	80
3.1.5	Confronto pratica tra l'adozione e non della GdR ...	81
3.2	Il legno: sistemi resistenti alle azioni orizzontali .....	84
3.2.1	Sistemi controventati nelle strutture in legno (acciaio e CA) .....	85
3.2.2	Sistemi puntuali: travi e pilastri .....	91
3.2.3	Sistemi misti: telai e pareti.....	93
3.2.4	Sistemi a pannelli portanti.....	93
3.2.5	Sistemi speciali: telaio e pannelli (Platform Frame)	94
3.2.6	Pareti in blocco di legno massiccio .....	95
3.3	Criticità delle strutture in Cemento Armato, acciaio e legno .....	95
3.3.1	Cemento Armato (CA) .....	95
3.3.2	Acciaio .....	98
3.3.3	Legno .....	99

## **Capitolo 4 Legno: materiali, connessioni e strutture .104**

4.1	Cenni storici .....	105
4.2	L'aspetto della sicurezza degli edifici in legno.....	105
4.3	Durabilità .....	107
4.4	Nuovi semi-lavorati .....	108
4.4.1	Legno massello .....	108
4.4.2	Legno lamellare .....	109
4.4.3	Pannelli a base di legno.....	110

4.5 Collegamenti delle strutture in legno .....	112
4.5.1 Duttilità nei collegamenti.....	116
4.6 Soluzioni abitative di emergenza .....	119
4.6.1 Casa "Baraccata" .....	119
4.6.2 Casa a "Gajola".....	120
4.6.3 L'Opus Craticium.....	121
4.6.4 SAE (Soluzioni Abitative Emergenziali).....	121
4.6.5 MAP (Moduli Abitativi Provvisori) .....	122
4.7 Indagini post-sisma del caso studio dei n. 12 di MAP di Montereale (L'Aquila) .....	126
4.7.1 Esito del sopralluogo e conclusioni.....	131
<b>Capitolo 5 Caso studio: una proposta di ricostruzione post-sisma per gli edifici civili.....</b>	<b>135</b>
5.1 Soluzione prefabbricata in legno come nuovo cuore di edifici in muratura danneggiati dal sisma .....	137
5.2 Caso applicativo: intervento su un'abitazione danneggiata dal sisma nel Comune di Montereale.....	139
5.2.1 Analisi della normativa e relazione illustrativa .....	140
5.2.2 Calcolo dell'azione e massa sismica del paramento murario .....	166
5.2.3 Connessione tra il paramento murario esterno e la struttura intelaiata in legno .....	170
5.2.4 Considerazioni peritali e stima dei costi di realizzazione .....	179

<b>Conclusioni .....</b>	<b>185</b>
<b>Ringraziamenti.....</b>	<b>187</b>
<b>Appendice A – Calcolo solo struttura intelaiata in legno .....</b>	<b>189</b>
<b>Appendice B – Calcolo considerando un incremento di massa sismica dovuto alla presenza della muratura rigidamente collegata al telaio in legno controventato .....</b>	<b>215</b>
<b>Appendice C - Carpenterie della struttura integrata considerando un incremento di massa sismica dovuto alla presenza della muratura rigidamente collegata al telaio in legno controventato.....</b>	<b>241</b>
<b>Appendice D - Spostamenti .....</b>	<b>245</b>
<b>Appendice E – Planimetrie, prospetti e sezioni finali.</b>	<b>253</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>257</b>

## **Abstract**

Gli eventi sismici che hanno colpito l'Italia Centrale negli ultimi dieci anni (L'Aquila 2009 e Amatrice 2016) hanno avuto conseguenze catastrofiche, prima di tutto per la perdita di vite umane e, parimenti, per l'intero costruito dei centri storici. L'impiego della buona arte muraria non è stato sufficiente e le murature, in molti casi di bassa qualità, non hanno resistito di fronte a scuotimenti di tale entità, sfarinandosi e causando l'immediato collasso delle strutture. Il reale problema per i piccoli comuni di rilevanza storica come quelli abruzzesi, è la ricostruzione, in particolar modo per le civili abitazioni a uno o due piani fuori terra. A tale scopo, la personale ricerca nel campo dell'ingegneria sismica (in occasione della redazione della tesi triennale e magistrale), ha permesso di formulare il caso studio proposto, ossia la progettazione di una struttura in legno intelaiata, travi e pilastri, che vada internamente a collegarsi in modo rigido ai paramenti murari (di una palazzina colpita da sisma e parzialmente crollata), garantendo così che la 'pelle' storica dell'edificio, resti inalterata. In pratica le murature esistenti avranno il compito di richiamare alla memoria la casa precedente, così da dare al luogo un aspetto assai simile alle costruzioni ante-sisma. Storia e architettura, infatti, sono la caratteristica principale di molti centri storici colpiti da terremoto. La soluzione abitativa 'casa' non deve inserirsi in modo traumatico nel tessuto esistente, così da apparire come 'new town' (parti di centro abitato completamente nuovo e avulso dalle caratteristiche degli edifici esistenti), bensì deve mantenere una continuità architettonica. Il progetto troverà il suo utilizzo non solo in aree esterne al centro storico colpito ma, per collocare la struttura, sarà possibile reperire anche piccole aree all'interno di esso. L'obiettivo è proprio quello di offrire nuova dignità alle case (recuperate) e alle strade delle località colpite. Una concreta soluzione abitativa per il

post-sisma (seppur per casi limitati) in cui città e borghi colpiti dal terremoto, tornino a vivere in un modo totalmente diverso dalla ricostruzione classica 'com'era e dov'era'. Filosofia quest'ultima non derogabile per le architetture storiche importanti come le chiese, i palazzi civili e altre architetture di valore storico. Trattandosi di struttura muraria esistente che conferisce alla nuova abitazione il giusto mascheramento storico per le facciate, si è posto però il problema del restauro delle murature e della loro stabilizzazione e unione alla nuova struttura in legno. Particolare questo assai importante poiché, in caso di ulteriori scuotimenti del suolo, la nuova struttura integrata dovrà essere in grado di rispondere positivamente per sé stessa e allo stesso tempo essere in grado di assorbire la massa sismica dei paramenti murari. Sono infatti i collegamenti, tra la muratura e la nuova struttura in legno, gli elementi presi in considerazione e la parte più importante e delicata durante la fase di progettazione.



## **Bibliografia**

- [1] Workshop INGV-ReLUIS INPUT SISMICO Anacapri, 12-13 Giugno 2006 sintesi delle attività svolte e delle conclusioni
- [2] Appunti di dinamica delle strutture, Prof. Giacomo Navarra
- [3] Alessandro Falaschi, cap. 4, in Elementi di trasmissione dei segnali e sistemi di telecomunicazione, Roma, Sapienza, Università di Roma, ottobre 2009
- [4] Luis Decanini, Laura Liberatore, Fabrizio Mollaioli, Giorgio Monti, Omar Al Shawa (2009), Studio preliminare della domanda sismica elastica ed anelastica in termini di energia, spostamento e forze (Rel. 1.0), disponibile presso il sito <http://www.reluis.it>
- [5] Preliminary study of Rieti earthquake Ground Motion Data V2
- [6] M. Piazza, R. Tomasi, R. Modena (2009) Strutture in legno, Milano, HOEPLI
- [7] Dispensa tecnica n.1 la controventatura nelle strutture di acciaio per l'edilizia civile – CISIA
- [8] Regione Toscana, Facoltà di Ingegneria di Firenze, Dipartimento Ingegneria Civile e Ambientale (2009) Linee guida per l'Edilizia in legno in Toscana ([www.progettosofie.it](http://www.progettosofie.it) link visitato in data 10/09/2017)
- [9] C. Barocci (1990), La casa antisismica: prototipi e brevetti, Università degli Studi di Reggio Calabria, Gangemi Editore
- [10] Università La Sapienza: Corso sulle nuove Norme NTC 2008, Giorgio Monti

[11] La controventatura di acciaio per l'edilizia civile, CISIA dispensa tecnica n. 1

[12] 'Tre criticità della casa in legno' link web <http://www.studioaxs.it> link visitato il 6/10/2017

[13] La sicurezza sismica degli edifici in legno, Ing. Andrea Polastri

[14] Promo Legno - [www.promolegno.com](http://www.promolegno.com), link visitato il 14/10/2017

[15] CNR Ivalsa - [www.ivalsa.cnr.it](http://www.ivalsa.cnr.it), link visitato in data 12/10/2017

[16] dataholz.com - [www.dataholz.com/it](http://www.dataholz.com/it), link visitato in data 12/10/2017

[17] Caratterizzazione del comportamento di giunti semirigidi per strutture lignee in zona sismica, Andrea Polastri, Prof. Maurizio Piazza, Prof. Ian Smith

[18] Antisismica - Sara Frumento

[19] Analisi ingegneristica dei Moduli Abitativi Provvisori: il sisma de L'Aquila del 6 Aprile 2009, Tesi di laurea, candidato Matteo Bagnoli, relatore Prof. Matteo Martini

[20] Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 14 Gennaio 2008

[21] Eurocodice n. 8, Progettazione delle strutture per la resistenza sismica