

**UNIVERSITÀ DI PISA**



**SCUOLA DI INGEGNERIA**

**Corso di Laurea Magistrale in**

**Ingegneria Edile e delle Costruzioni Civili**

Tesi di Laurea

**MIGLIORAMENTO SISMICO ED ENERGETICO DI EDIFICIO  
IN MURATURA MEDIANTE PANNELLI IN LEGNO**

Relatori

**Prof. Ing. Mauro Sassu**

**Prof. Ing. Giampaolo Munafò**

Candidato

**Gianluca Manzella**

Anno Accademico 2013/2014

# INDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>INTRODUZIONE</b> .....                              | <b>5</b>  |
| <b>1. STUDIO DELLO STATO DI FATTO</b> .....            | <b>7</b>  |
| 1.1. INQUADRAMENTO TERRITORIALE .....                  | 7         |
| 1.2. INQUADRAMENTO STORICO .....                       | 9         |
| 1.3. RELAZIONE ILLUSTRATIVA .....                      | 10        |
| 1.4. VITA NOMINALE DELL'EDIFICIO .....                 | 16        |
| 1.5. CLASSE D'USO .....                                | 16        |
| 1.6. PERIODO DI RIFERIMENTO .....                      | 16        |
| <b>2. MODELLAZIONE DELLO STATO DI FATTO</b> .....      | <b>17</b> |
| 2.1. RILIEVO .....                                     | 17        |
| 2.2. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI .....             | 18        |
| 2.3. MODELLAZIONE STRUTTURA .....                      | 21        |
| 2.3.1. SEZIONE DEI MASCHI MURARI .....                 | 23        |
| 2.4. ANALISI DEI CARICHI .....                         | 28        |
| 2.4.1. CARICHI DEI SOLAI .....                         | 28        |
| 2.4.2. ELEMENTI DIVISORI INTERNI .....                 | 28        |
| 2.4.3. CARICO VARIABILE .....                          | 28        |
| 2.4.4. COPERTURA IN LEGNO .....                        | 29        |
| 2.4.5. APPLICAZIONE DEI CARICHI ALLA STRUTTURA .....   | 29        |
| 2.4.6. CARICO NEVE .....                               | 29        |
| 2.4.7. CARICO VENTO .....                              | 30        |
| 2.4.7.1. Pressione cinetica di riferimento $q_b$ ..... | 30        |
| 2.4.7.2. Coefficiente di esposizione $c_e$ .....       | 31        |
| 2.4.7.3. Coefficiente dinamico $c_d$ .....             | 32        |
| 2.4.7.4. Coefficiente di forma $c_p$ .....             | 33        |
| 2.4.8. CARICO SISMA .....                              | 34        |
| 2.5. DEFINIZIONE COMBINAZIONI DI CARICO .....          | 40        |
| 2.5.1. DEFINIZIONE COMBINAZIONI SISMICHE .....         | 41        |
| 2.6. REGOLARITÀ IN PIANTA .....                        | 41        |
| 2.7. REGOLARITÀ IN ALTEZZA .....                       | 42        |
| 2.8. DEFINIZIONE MOMENTI TORCENTI .....                | 42        |
| 2.9. RIGIDEZZA DEL SOLAIO .....                        | 45        |
| 2.9.1. SOLAIO RIGIDO .....                             | 45        |
| 2.9.2. SOLAI FLESSIBILI .....                          | 45        |
| <b>3. ANALISI DELLO STATO DI FATTO</b> .....           | <b>54</b> |
| 3.1. L'ANALISI MODALE .....                            | 54        |
| 3.1.1. I MODI DI VIBRARE DELLA STRUTTURA .....         | 55        |
| 3.2. SOLLECITAZIONI SUGLI ELEMENTI .....               | 59        |
| 3.3. VERIFICHE DEGLI ELEMENTI .....                    | 67        |
| 3.3.1. VERIFICA A PRESSOFLESSIONE NEL PIANO .....      | 67        |
| 3.3.2. VERIFICA A PRESSOFLESSIONE FUORI PIANO .....    | 68        |

|  |            |
|--|------------|
| 3.3.3. VERIFICA A TAGLIO .....   | 68         |
| 3.3.4. RISULTATI DELLE VERIFICHE.....  | 69         |
| 3.4. VERIFICA DEGLI SPOSTAMENTI .....  | 80         |
| 3.5. VERIFICA DEL SOLAIO INTERPIANO ALLO STATO LIMITE ULTIMO .....             | 81         |
| 3.5.1. VERIFICA DEL SOLAIO CON LA NORMATIVA ATTUALE.....                       | 82         |
| 3.5.2. VERIFICA DEL SOLAIO CON LA NORMATIVA DELL'EPOCA .....                   | 86         |
| <b>4. INDICE DI RISCHIO E LIVELLO DI MIGLIORAMENTO SISMICO .....</b>           | <b>89</b>  |
| 4.1. DETERMINAZIONE DELL'INDICE DI RISCHIO.....                                | 89         |
| 4.2. TEMPO DI RITORNO DELLA FORZA SISMICA .....                                | 90         |
| 4.3. AZIONE SISMICA CON TEMPO DI RITORNO DI 167 ANNI.....                      | 90         |
| 4.4. DEFINIZIONE MOMENTI TORCENTI.....   | 94         |
| 4.5. SOLLECITAZIONI SUGLI ELEMENTI CON TEMPO DI RITORNO PARI A 167 ANNI .....  | 94         |
| 4.6. VERIFICHE DEGLI ELEMENTI PER TEMPO DI RITORNO PARI A 167 ANNI.....        | 103        |
| <b>5. MIGLIORAMENTO SISMICO DELL'EDIFICIO.....</b>                             | <b>120</b> |
| 5.1. CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE XLAM .....                                | 120        |
| 5.1.1. CLASSE DI DURATA DEL CARICO .....                                       | 120        |
| 5.1.2. CLASSE DI SERVIZIO .....  | 121        |
| 5.1.3. RESISTENZA DI PROGETTO.....   | 122        |
| 5.1.4. PROPRIETÀ MECCANICHE DEL LEGNO MASSICCIO.....                           | 123        |
| 5.2. COSTITUZIONE DEL PANNELLO XLAM .....                                      | 124        |
| 5.3. TECNOLOGIA DI CONNESSIONE TRA MURATURA E XLAM.....                        | 126        |
| 5.4. MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA .....  | 129        |
| 5.5. ANALISI MODALE SUL MODELLO.....   | 131        |
| 5.6. VERIFICA DEGLI ELEMENTI IN MURATURA.....                                  | 133        |
| 5.6.1. PRESSOFLESSIONE NEL PIANO E PRESSOFLESSIONE FUORI PIANO .....           | 133        |
| 5.6.2. TAGLIO .....  | 140        |
| 5.7. VERIFICA DEGLI ELEMENTI IN LEGNO.....                                     | 146        |
| 5.8. VERIFICA DEGLI ELEMENTI DI CONNESSIONE.....                               | 150        |
| 5.8.1. MECCANISMO RESISTENTE A SFILAMENTO DELLA BARRA FILETTATA .....          | 156        |
| 5.9. VERIFICA DEI COLLEGAMENTI PER LA PARETE IN DIREZIONE Y.....               | 159        |
| 5.9.1. CONNESSIONI PARETI PIANO TERRA CON FONDAZIONE (ANGOLARI) .....          | 159        |
| 5.9.1.1. Verifica a trazione.....  | 159        |
| 5.9.1.2. Verifica a taglio .....   | 162        |
| 5.9.2. CONNESSIONI TRA ELEMENTI PARETE .....                                   | 163        |
| 5.9.3. CONNESSIONI AD ANGOLO PER LE PARETI.....                                | 165        |
| 5.10. VERIFICA DEI COLLEGAMENTI PER LA PARETE IN DIREZIONE X.....              | 167        |
| 5.10.1. CONNESSIONI PARETI PIANO TERRA CON FONDAZIONE (ANGOLARI) .....         | 167        |
| 5.10.1.1. Verifica a trazione.....   | 167        |
| 5.10.1.2. Verifica a taglio .....  | 168        |
| 5.10.2. CONNESSIONI TRA ELEMENTI PARETE .....                                  | 168        |
| 5.10.3. VERIFICA DEGLI ELEMENTI SOTTOFINESTRA IN LEGNO .....                   | 168        |
| 5.11. FONDAZIONE DELLA STRUTTURA IN LEGNO .....                                | 169        |
| 5.11.1. MODELLAZIONE DELLA TRAVE DI FONDAZIONE .....                           | 170        |
| 5.11.2. VERIFICA DELLA TRAVE DI FONDAZIONE.....                                | 172        |
| 5.11.2.1. Verifica a flessione .....   | 172        |
| 5.11.2.2. Verifica a taglio .....  | 173        |
| 5.11.2.3. Verifica a flessione e taglio dell'ala .....                         | 174        |
| 5.11.3. UNIONE DELLA FONDAZIONE ALLA STRUTTURA ESISTENTE.....                  | 176        |
| 5.12. COLLEGAMENTO ALLE TRAVI DI COPERTURA.....                                | 177        |
| 5.13. MIGLIORAMENTO DEL COMPORTAMENTO PER TEMPO DI RITORNO PARI A 475 ANNI.... | 179        |
| 5.13.1. VERIFICA DEGLI ELEMENTI IN MURATURA .....                              | 179        |
| 5.13.2. VERIFICA DEGLI ELEMENTI IN LEGNO .....                                 | 184        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>6. MIGLIORAMENTO ENERGETICO DELLE PARETI .....</b>                      | <b>188</b> |
| 6.1. CARATTERIZZAZIONE DELLA ZONA CLIMATICA .....                          | 188        |
| 6.2. VALUTAZIONE DELL'ESISTENTE .....                                      | 190        |
| 6.3. CALCOLO DELLE CARATTERISTICHE TERMICHE STATICHE.....                  | 191        |
| 6.4. CALCOLO DELLE CARATTERISTICHE TERMICHE DINAMICHE .....                | 192        |
| 6.5. MIGLIORAMENTO DELLE CARATTERISTICHE ENERGETICHE .....                 | 196        |
| 6.5.1. <i>MATERIALE INSILABILE IN INTERCAPEDINE</i> .....                  | 196        |
| 6.5.2. <i>ISOLANTE ESTERNO</i> .....                                       | 198        |
| 6.5.3. <i>COMPORAMENTO COMPLESSIVO DELLA PARETE</i> .....                  | 200        |
| 6.5.3.1. Variante di isolamento: Aerogel .....                             | 200        |
| 6.5.4. <i>ELIMINAZIONE DEI FENOMENI DI CONDENSA</i> .....                  | 201        |
| <b>7. SCHEDE TECNICHE DEI MATERIALI E COMPUTO METRICO ESTIMATIVO .....</b> | <b>207</b> |
| 7.1. CHIODI.....   | 207        |
| 7.1.1. <i>CHIDO ANKER 4,0X60</i> .....                                     | 207        |
| 7.2. VITI.....   | 207        |
| 7.2.1. <i>VITI 8X220</i> .....   | 207        |
| 7.2.2. <i>VITI 10X220</i> .....  | 208        |
| 7.3. ANGOLARI .....  | 209        |
| 7.3.1. <i>ANGOLARE ADV SQTH 540</i> .....                                  | 209        |
| 7.3.2. <i>ANGOLARE ADV SQHT 340</i> .....                                  | 210        |
| 7.3.3. <i>ANGOLARE TITAN TCN 240</i> .....                                 | 211        |
| 7.3.4. <i>ANGOLARE TITAN TCN 200</i> .....                                 | 212        |
| 7.4. BARRE .....   | 212        |
| 7.4.1. <i>BARRA FILETTATA M16</i> .....                                    | 212        |
| 7.4.2. <i>BARRA FILETTATA M12</i> .....                                    | 213        |
| 7.5. BANDE .....   | 213        |
| 7.5.1. <i>BANDA 80X240X1,5</i> .....                                       | 213        |
| 7.5.2. <i>BANDA 100X320X1,5</i> .....                                      | 214        |
| 7.5.3. <i>BANDA 120X380X1,5</i> .....                                      | 215        |
| 7.5.4. <i>BANDA 140X440X1,5</i> .....                                      | 216        |
| 7.6. COMPUTO METRICO ESTIMATIVO.....                                       | 217        |
| <b>8. CONCLUSIONI .....</b>  | <b>221</b> |
| <b>NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....</b>                                      | <b>223</b> |
| INTERVENTO STRUTTURALE .....   | 223        |
| INTERVENTO ENERGETICO.....   | 224        |
| <b>BIBLIOGRAFIA.....</b>   | <b>225</b> |
| <b>RINGRAZIAMENTI .....</b>  | <b>226</b> |