

D. Gargaro

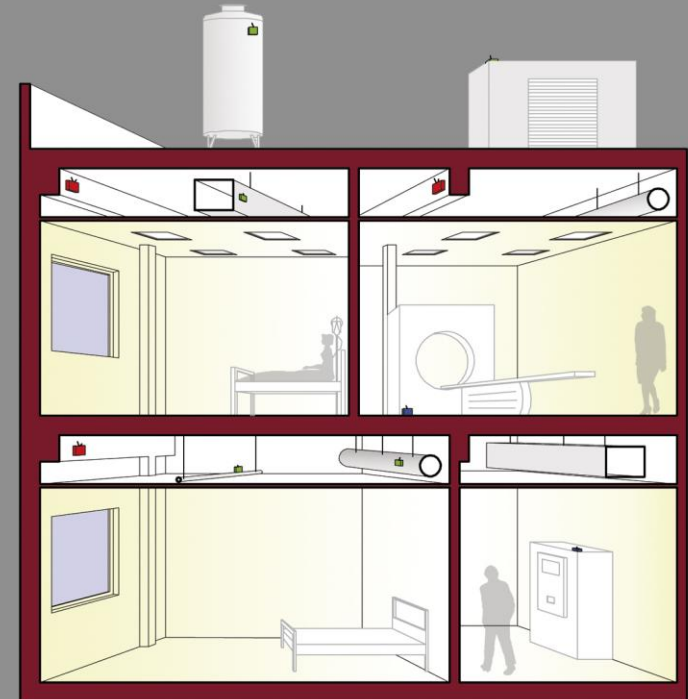
Analisi modale output-only e monitoraggio strutturale per la caratterizzazione dinamica di componenti strutturali e non strutturali in complessi ospedalieri



Università degli Studi del Molise

ANALISI MODALE OUTPUT-ONLY E MONITORAGGIO STRUTTURALE PER LA CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DI COMPONENTI STRUTTURALI E NON STRUTTURALI IN COMPLESSI OSPEDALIERI

ICAR/09



Danilo Gargaro

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DEL MOLISE

DIPARTIMENTO DI BIOSCIENZE E TERRITORIO

CURRICULUM TERRITORIALE

XXX CICLO



***Analisi modale output-only e monitoraggio
strutturale per la caratterizzazione dinamica di
componenti strutturali e non strutturali in
complessi ospedalieri***

ICAR/09

DANILO GARGARO

TUTOR:
PROF. SALVATORE GERBINO

COORDINATORE:
PROF.SSA
GABRIELLA STEFANIA SCIPPA

CO-TUTOR:
PROF. GIOVANNI FABBROCINO

a.a. 2016-2017

Alla mia famiglia

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro di tesi non è soltanto frutto del mio impegno e della mia passione maturata con gli anni, ma anche il lavoro di coloro che mi sono stati vicino e mi hanno incoraggiato. Un ringraziamento al prof. Salvatore Gerbino per l'impegno profuso all'interno del Collegio dei Docenti, per la sua disponibilità e per gli spunti di discussione e riflessione. Un particolare ringraziamento al prof. Giovanni Fabbrocino, fonte inesauribile di conoscenza, per avermi dato l'occasione di svolgere questo lavoro di tesi e per la formazione in tutti questi anni. Una persona che devo particolarmente ringraziare è il prof. Carlo Rainieri che con impegno e competenza mi ha seguito in ogni momento fornendomi tutti gli strumenti di cui avevo bisogno per intraprendere la strada giusta e portare a compimento la mia tesi. È a lui che devo il lavoro svolto.

Infine, un ringraziamento a tutti coloro che hanno condiviso con me questo percorso e che mi hanno incoraggiato e supportato per portarlo a compimento.

INDICE

INDICE FIGURE..... V

INDICE TABELLE..... XIV

CAPITOLO 1 INTRODUZIONE 1

1.1 VULNERABILITÀ DELLE STRUTTURE OSPEDALIERE.....3

1.1.1 Vulnerabilità della componente strutturale.....7

1.1.2 Vulnerabilità della componente non strutturale ed
impiantistica..... 8

1.1.3 Vulnerabilità della componente organizzativa 12

1.2 MONITORAGGIO DI STRUTTURE OSPEDALIERE.....13

1.3 STRUTTURA DELLA TESI.....15

CAPITOLO 2 RISPOSTA SISMICA DELLE STRUTTURE

OSPEDALIERE ESISTENTI.....19

2.1 TIPICI DANNI DI COMPONENTI STRUTTURALI.....22

2.2 TIPICI DANNI DI COMPONENTI NON-STRUTTURALI.....24

2.2.1 Componenti architettonici25

Indice

| | | |
|--|--|-----------|
| 2.2.1.1 | <i>Controsoffitti e fonti di illuminazione</i> | 25 |
| 2.2.1.2 | <i>Pareti di ripartizione</i> | 28 |
| 2.2.1.3 | <i>Pareti esterne</i> | 30 |
| 2.2.1.4 | <i>Pareti vetrate</i> | 32 |
| 2.2.1.5 | <i>Parapetti e appendici</i> | 33 |
| 2.2.1.6 | <i>Scale</i> | 34 |
| 2.2.2 | Componenti meccanici, elettrici ed impianti | 35 |
| 2.2.2.1 | <i>Ascensori</i> | 35 |
| 2.2.2.2 | <i>Generatori di emergenza</i> | 37 |
| 2.2.2.3 | <i>Caldiaie, pompe e refrigeratori</i> | 39 |
| 2.2.2.4 | <i>Impianti di riscaldamento, ventilazione e condizionamento</i> | 41 |
| 2.2.2.5 | <i>Serbatoi</i> | 44 |
| 2.2.2.6 | <i>Tubazioni</i> | 46 |
| 2.2.2.7 | <i>Condotti dell'aria</i> | 48 |
| 2.2.2.8 | <i>Impianto antincendio</i> | 49 |
| 2.2.3 | Apparecchiature medicali ed arredi | 50 |
| 2.2.3.1 | <i>Lampade scialitiche</i> | 50 |
| 2.2.3.2 | <i>X-ray e TAC</i> | 50 |
| 2.2.3.3 | <i>Laboratori</i> | 52 |
| 2.4 | OLIVE VIEW MEDICAL CENTER - CALIFORNIA | 52 |
| 2.5 | OSPEDALE SAN SALVATORE - L'AQUILA | 57 |
| 2.6 | CLASSIFICAZIONE COMPONENTI NON STRUTTURALI | 62 |
| CAPITOLO 3 IL PARADIGMA DELLA 'SMART HEALTH FACILITY' | | 65 |

| | |
|---|----------------|
| 3.1 SISTEMI DI MONITORAGGIO DI STRUTTURE OSPEDALIERE | 67 |
| 3.1.1 Veterans Affairs Medical Center, San Diego - California | 72 |
| 3.1.2 Palazzina Hospice "Nesima" - Catania | 75 |
| 3.1.3 Osservazioni sui sistemi di monitoraggio installati in complessi ospedalieri..... | 78 |
| 3.2 SMART HEALTH FACILITY | 80 |
| 3.3 PROGETTAZIONE DI UNA SHF | 86 |
| 3.4 STRATEGIA DI SVILUPPO DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO A SUPPORTO DI PRESIDII OSPEDALIERI | 91 |
| 3.4.1 Sistema di monitoraggio strutturale | 93 |
| 3.4.2 Apparecchiature | 97 |
| 3.4.3 Impianti..... | 99 |
| CAPITOLO 4 CARATTERIZZAZIONE DEL DANNO | 103 |
| 4.1 STATISTICAL PATTERN RECOGNITION | 105 |
| 4.2 ALCUNI ASSIOMI FONDAMENTALI DEL MONITORAGGIO STRUTTURALE..... | 113 |
| 4.3 INDICI DI DANNO | 115 |
| 4.4 IDENTIFICAZIONE DINAMICA AUTOMATICA | 123 |
| 4.4.1 L' algoritmo per l'identificazione dinamica automatica | 130 |
| 4.5 MODELLI DELLE SERIE TEMPORALI E ANALISI DEGLI OUTLIERS..... | 134 |
| 4.5.1 Metodi basati sulla misura dei fattori ambientali e operativi | 135 |
| 4.5.2 Rimozione degli effetti ambientali e operativi in assenza delle relative misure | 141 |
| 4.5.3 Control Chart | 143 |

CAPITOLO 5 PROPOSTA METODOLOGICA E RISULTATI

APPLICATIVI145

**5.1 MONITORAGGIO STRUTTURALE OSPEDALE "A. CARDARELLI" DI
CAMPOBASSO146**

5.1.1 Progettazione ed installazione del sistema di monitoraggio
strutturale 150

5.1.1.1 Identificazione dinamica preliminare 158

5.1.2 Risultati del monitoraggio..... 165

5.1.3 Procedure di identificazione del danno 169

5.1.4 Eventi sismici registrati 190

5.2 CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DI UN DISTRIBUTORE

AUTOMATICO DI MEDICINALI..... 200

5.2.1 Procedure OMA ed EMA per l'analisi dei dati 204

5.2.2 Risultati 207

5.3 SERBATOIO 212

5.3.1 Risultati sperimentali 219

5.3.2 Modello agli elementi finiti 227

5.3.3 Strategie di monitoraggio per serbatoi 235

CAPITOLO 6 CONCLUSIONI.....237

BIBLIOGRAFIA 243

INDICE FIGURE

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 - Domanda di assistenza medica a seguito di un evento sismico (adattato da WHO & NSET, 2004). | 2 |
| Figura 1.2 - Costi per la realizzazione degli ospedali (Miranda & Taghavi, 2003). | 4 |
| Figura 1.3 - Componenti di una struttura ospedaliera. | 6 |
| Figura 2.1 - Elementi strutturali e non strutturali presenti un edificio ospedaliero. | 21 |
| Figura 2.2 - Collasso del primo livello dell'Olive View Hospital (FEMA, 2007)..... | 23 |
| Figura 2.3 - Danni alle colonne del Barrington Medical Building (Faison et al., 2004). | 24 |
| Figura 2.4 - Danni alla controsolfittatura nel reparto di degenza (FEMA, 2012)..... | 26 |
| Figura 2.5 - Danneggiamento del sistema di illuminazione (Linee Guida Reluis, 2009). | 27 |
| Figura 2.6 - Ribaltamento di un muro di ripartizione presso il Santiago General Hospital in Cile (Fierro et al., 2011). | 28 |

Indice

| | |
|---|----|
| Figura 2.7 - Danno ad una parete utilizzata per il supporto di tubature per l'antincendio (FEMA, 2012). | 29 |
| Figura 2.8 - Danneggiamento degli ancoraggi di un pannello prefabbricato con conseguente caduta a terra (FEMA, 2012). | 31 |
| Figura 2.9 - Danneggiamento superficie vetrata (FEMA, 2012). | 32 |
| Figura 2.10 - Ribaltamento di un parapetto con conseguente danneggiamento di auto in sosta (FEMA, 2012). | 34 |
| Figura 2.11 - Danneggiamento di scale (FEMA, 2012). | 35 |
| Figura 2.12 - Danni alle rotaie causati dal deragliamento dei contrappesi (FEMA, 2012). | 36 |
| Figura 2.13 - Supporti di un generatore danneggiati a seguito di un sisma (FEMA, 2007). | 38 |
| Figura 2.14 - Batterie non opportunamente ancorate hanno subito un danneggiamento a seguito di un evento sismico (Miranda & Taghavi, 2003). | 38 |
| Figura 2.15 - Parziale ribaltamento di un refrigeratore (FEMA, 2007). | 39 |
| Figura 2.16 - Scivolamento di pompa e blocco in cemento (FEMA, 2012). | 40 |
| Figura 2.17 - Impianto HVAC posto al livello della copertura che ha manifestato il danneggiamento delle connessioni (FEMA, 2012). | 41 |
| Figura 2.18 - Ribaltamento di unità di condizionamento (FEMA, 2012). | 42 |

| | |
|---|--|
| Figura 2.19 - Pannelli di tamponamento danneggiati a causa dell'oscillazione dei componenti HVAC (FEMA, 2012). .43 | |
| Figura 2.20 - Slittamento del serbatoio dal cordolo di supporto (FEMA, 2012).....44 | |
| Figura 2.21 - Ribaltamento di un serbatoio verticale per inadeguatezza nelle connessioni (FEMA, 2012).....45 | |
| Figura 2.22 - Danni a tubazioni a causa di un attraversamento in un soffitto (FEMA, 2012).46 | |
| Figura 2.23 - Rottura dei condotti dell'aerazione (FEMA, 2012).47 | |
| Figura 2.24 - Danneggiamento impianto sprinkler all'interno della controsoffittatura (FEMA, 2012).....48 | |
| Figura 2.25 - Danneggiamento dei supporti di serbatoi dell'impianto antincendio e conseguente rottura delle tubazioni (FEMA, 2012).....49 | |
| Figura 2.26 - Rottura braccio di una lampada scialitica (Rodgers et al.,2009).50 | |
| Figura 2.27 - Danno di macchina X-ray a seguito di evento sismico (FEMA, 2007).....51 | |
| Figura 2.28 - Caduta a terra di medicinali posizionati su scaffalature (Linee guida Reluis, 2009).52 | |
| Figura 2.29 - Ribaltamento della torre scala (FEMA, 2007).53 | |
| Figura 2.30 - Danneggiamento alle connessioni di serbatoi in copertura (FEMA, 2007).....55 | |
| Figura 2.31 - Ribaltamento di serbatoi per lo stoccaggio di carburante (FEMA, 2007).....56 | |

Indice

| | |
|--|----|
| Figura 2.32 - Danneggiamento colonna al piano terra..... | 58 |
| Figura 2.33 - Rottura a taglio di una colonna tozza..... | 59 |
| Figura 2.34 - Ingresso pronto soccorso Ospedale San Salvatore: situazione pre evento (a); ribaltamento della tamponatura del secondo livello (b). | 61 |
| Figura 3.1 - Mappa con indicazione dei sistemi di monitoraggio installati sugli edifici del Veterans Affairs' Hospital negli Stati Uniti (http://nsmp.wr.usgs.gov/). | 68 |
| Figura 3.2 - Architettura di un sistema di monitoraggio per i servizi sanitari negli U.S.A. - adattato da (Ulusoy et al., 2013)... | 69 |
| Figura 3.3 - Edificio No.1 San Diego Veterans Affairs Medical Center, California (vista frontale) (Kalkan et al., 2012)..... | 73 |
| Figura 3.4 - Layout dei 60 sensori nell'edificio 1 della San Diego V.A. Medical Center, California (Kalkan et al., 2012)..... | 74 |
| Figura 3.5 - Hospice, Edificio corpo A: aerea dell'edificio corpo A (a); vista lato nord - ovest (b) (http://www.protezionecivile.gov.it)..... | 76 |
| Figura 3.6 - Hospice, edificio corpo A : Pianta Piano 1 Seminterrato(a); legenda (b); layout sensori e centralina (c) (http://www.protezionecivile.gov.it)..... | 77 |
| Figura 3.7 - Sensori ed integrazione dati in una SHF..... | 80 |
| Figura 3.8 - Architettura di un sistema di monitoraggio integrato per SHF..... | 82 |
| Figura 3.9 - Accelerometri piezoelettrici..... | 93 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.10 - Cavo coassiale per accelerometri piezoelettrici con attacco MIL-C-5015 - BNC (www.pcb.com). | 94 |
| Figura 3.11 - Chassis modulare e moduli per l'acquisizione di accelerometri e sensori di temperatura. | 95 |
| Figura 3.12 - Termocoppia tipo T. | 96 |
| Figura 3.13 - Accelerometro triassiale PCB 356M98 (www.pcb.com). 98 | |
| Figura 3.14 - Strain gauge. | 99 |
| Figura 3.15 - Esempio di impianto in complesso ospedaliero. | 100 |
| Figura 3.16 - Sensore in fibra ottica os-1200 (www.micronoptics.com). | 101 |
| Figura 4.1 - Flowchart di ARES (Rainieri & Fabbrocino, 2010). | 131 |
| Figura 5.1 - Vista dall'alto del P. O. "A. Cardarelli" di Campobasso. 147 | |
| Figura 5.2 - Suddivisione in organismi strutturali (Gallina et al., 2010). | 147 |
| Figura 5.3 - P.O. "A. Cardarelli"; blocchi V e VI..... | 148 |
| Figura 5.4 - Giunto strutturale tra i blocchi V e VI. | 150 |
| Figura 5.5 - Accelerometri force-balance kinematics ES-U2. | 152 |
| Figura 5.6 - Layout sistema di monitoraggio: quinto (a) e sesto piano (b)..... | 154 |
| Figura 5.7 - Installazione dei sensori. | 156 |
| Figura 5.8 - Attraversamento dei cavi in corrispondenza del giunto strutturale. | 157 |
| Figura 5.9 - Hardware di acquisizione ed elaborazione dati. | 158 |
| Figura 5.10 - Diagramma valori singolari. | 160 |
| Figura 5.11 - Diagramma di stabilizzazione. | 161 |

Indice

| | |
|--|-----|
| Figura 5.12 - Rappresentazione grafica delle forme modali sperimentali..... | 164 |
| Figura 5.13 - Tracking dei principali 4 modi di vibrazione per il mese di Aprile 2017..... | 166 |
| Figura 5.14 - Tracking delle frequenze naturali e della temperatura per una durata di 9 giorni. | 167 |
| Figura 5.15 - Tracking dello smorzamento del primo modo di vibrazione durante il mese di Aprile 2017..... | 168 |
| Figura 5.16 - Raggruppamenti di differenti dimensioni: punti originali (a); cluster identificati con l'algoritmo K-means (Tan et al., 2005)..... | 175 |
| Figura 5.17 - Raggruppamenti di differenti densità: punti originali (a); cluster identificati con l'algoritmo K-means (Tan et al., 2005). | 176 |
| Figura 5.18 - Raggruppamenti non globulari: punti originali (a); cluster identificati con l'algoritmo K-means (Tan et al., 2005). | 176 |
| Figura 5.19 - Serie dati considerata..... | 178 |
| Figura 5.20 - Rappresentazione dei dati privi di danneggiamento: raggruppamento originale (a) e raggruppamento con algoritmo K-means (b)..... | 180 |
| Figura 5.21 - Danno del 5% con percentuale dei dati non danneggiati del 40% (ND=40%)..... | 182 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.22 - Rappresentazione grafica della distanza tra i centroidi per differenti percentuali di dati non danneggiati (%ND). | 183 |
| Figura 5.23 - Rappresentazione grafica della distanza tra i centroidi per differenti livelli di danno (%D)..... | 184 |
| Figura 5.24 - Rappresentazione dati nello spazio delle componenti principali: raggruppamento ottimale (a); raggruppamento K-means (b) ($D=2\%$; %ND=50%). | 185 |
| Figura 5.25 - Rappresentazione dati nello spazio delle componenti principali: raggruppamento ottimale (a); raggruppamento K-means (b) ($D=3\%$; %ND=50%). | 186 |
| Figura 5.26 - Rappresentazione dati nello spazio delle componenti principali: raggruppamento ottimale (a); raggruppamento K-means (b) ($D=5\%$; %ND=50%). | 187 |
| Figura 5.27 - Variazione della distanza dei centroidi al variare della finestra temporale..... | 189 |
| Figura 5.28 - Localizzazione evento sismico del 4 Aprile 2016..... | 192 |
| Figura 5.29 - Serie temporali registrate dal sistema di monitoraggio durante l'evento del 4 Aprile 2016 con epicentro in Campobasso. | 193 |
| Figura 5.30 - Andamento delle frequenze naturali in concomitanza dell'evento sismico del 4 Aprile 2016..... | 194 |
| Figura 5.31 - Rappresentazione dati nello spazio delle componenti principali: raggruppamento pre e post evento (a); raggruppamento K-means (b). | 195 |

Indice

| | |
|--|-----|
| Figura 5.32 - Serie temporali registrate dal sistema di monitoraggio durante l'evento del 4 Aprile 2016 con epicentro in Campobasso. | 197 |
| Figura 5.33 - Serie temporali registrate dal sistema di monitoraggio durante l'evento del 30 Ottobre 2016 con epicentro in Norcia..... | 198 |
| Figura 5.34 - Andamento delle frequenze naturali in concomitanza dell'evento sismico del 30 Ottobre 2016. | 199 |
| Figura 5.35. Vista esterna (a) ed interna (https://bustersystem.gpi.it) (b) del distributore. | 201 |
| Figura 5.36 - Layout di prova (a) ed ubicazione dei due Busterspid (b). | 203 |
| Figura 5.37 - Sensori piezoelettrici e hardware di acquisizione (a); martello strumentato (b)..... | 204 |
| Figura 5.38 - Registrazione impulso (a); spettro dell'impulso (b); Funzione di Risposta in Frequenza (FRF) (c)..... | 208 |
| Figura 5.39 - Rappresentazione grafica delle forme modali sperimentali..... | 209 |
| Figura 5.40 - Grafico dei valori singolari: distributore al primo piano (a); distributore al secondo piano (b). In rosso la banda di frequenza della struttura. | 210 |
| Figura 5.41 - Serbatoio in acciaio oggetto di sperimentazione. | 213 |
| Figura 5.42 - Serbatoio ancorato al suolo mediante viti di fissaggio (non danneggiato). | 214 |
| Figura 5.43 - Serbatoio non ancorato al suolo (danneggiato)..... | 215 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.44 - Accelerometri piezoelettrici (a); sensore di temperatura (b); centralina di acquisizione (c). | 216 |
| Figura 5.45 - Vista frontale del serbatoio (a) e layout di prova (b)..... | 218 |
| Figura 5.46 - Rappresentazione grafica delle forme modali identificate. | 221 |
| Figura 5.47 - Diagramma Valori Singolari ottenuto nella configurazione non danneggiata con livello di riempimento del 90%. | 222 |
| Figura 5.48 - Evoluzione delle frequenze naturali per differenti livelli di riempimento e condizioni di vincolo. | 226 |
| Figura 5.49 - Evoluzione dei rapporti di smorzamento per differenti livelli di riempimento e condizioni di vincolo. | 227 |
| Figura 5.50 - Modello elementi finiti (a); elemento SHELL 281 (b); elemento FLUID 220 (c). | 229 |
| Figura 5.51 - Area di base di ciascun supporto: vincolo cerniera in un nodo (a); tutti i nodi vincolati come cerniera (b); un nodo vincolato come cerniera ed i restanti nodi vincolati secondo la direzione verticale (c). | 231 |
| Figura 5.52 - Evoluzione frequenze naturali del modello agli elementi finiti e confronto con i risultati sperimentali. | 234 |

INDICE TABELLE

| | |
|---|-----|
| Tabella 1.1 - Elementi non strutturali presenti all'interno di una struttura ospedaliera con indicazione del livello di vulnerabilità ed importanza (NTC, 2008). | 12 |
| Tabella 2.1 - Classificazione dei componenti in funzione della loro sensibilità. | 64 |
| Tabella 3.1 - Elenco degli ospedali V.A. caratterizzati dall'installazione di un sistema di monitoraggio avanzato della risposta dinamica in presenza di azioni sismiche..... | 70 |
| Tabella 3.2 - Sistemi di monitoraggio installati in complessi ospedalieri italiani. | 72 |
| Tabella 3.3 - Ubicazione e descrizione dei sensori (http://www.protezionecivile.gov.it)..... | 78 |
| Tabella 3.4 - Tipologia di sensore e campo di applicazione. | 88 |
| Tabella 5.1 - Risultati dell'identificazione: frequenze naturali e rapporti di smorzamento. | 162 |
| Tabella 5.2 - Forme modali sperimentali. | 162 |
| Tabella 5.3 - Matrice degli AUTO-MAC. | 164 |

| | |
|--|-----|
| Tabella 5.4 - Distanza tra i centroidi per differenti livelli di danno (%D) e percentuali di dati non danneggiati (%ND). | 182 |
| Tabella 5.5 - Lista eventi sismici registrati presso il Presidio Ospedaliero per gli anni 2016 e 2017 (http://info.terremoti.ingv.it/)..... | 192 |
| Tabella 5.6 - Caratteristiche dei sensori. | 202 |
| Tabella 5.7 - Caratteristiche hardware di acquisizione..... | 202 |
| Tabella 5.8 - Caratteristiche martello strumentato. | 202 |
| Tabella 5.9 - Stima delle frequenze naturali dei Busterspid al primo e quinto piano. | 209 |
| Tabella 5.10 - Frequenze naturali ed intervallo di confidenza 2σ per differenti rapporti di riempimento in configurazione non danneggiata..... | 222 |
| Tabella 5.11 - Rapporto di smorzamento ed intervallo di confidenza 2σ per differenti rapporti di riempimento in configurazione non danneggiata. | 223 |
| Tabella 5.12 - Frequenze naturali ed intervallo di confidenza 2σ per differenti rapporti di riempimento in configurazione danneggiata..... | 223 |
| Tabella 5.13 - Rapporto di smorzamento ed intervallo di confidenza 2σ per differenti rapporti di riempimento in configurazione danneggiata..... | 223 |
| Tabella 5.14 - Differenza percentuale delle frequenze naturali tra la configurazione danneggiata e non danneggiata. | 225 |
| Tabella 5.15 - Proprietà dei materiali. | 228 |

Indice

| | |
|--|-----|
| Tabella 5.16 - Confronto dati sperimentali e modello agli elementi finiti dei primi modi globali del serbatoio vuoto. | 232 |
| Tabella 5.17 - Confronto dati sperimentali e modello agli elementi finiti in funzione del livello di riempimento. | 233 |

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

A fronte di un evento sismico la priorità è la salvaguardia delle vite umane e l'assistenza dei feriti. Per assicurare ciò vi sono una serie di strutture che rivestono un ruolo fondamentale nell'emergenza post-sisma e che possono essere definite strategiche per i servizi di protezione civile che devono assolvere. Tra queste le strutture ospedaliere svolgono un ruolo rilevante.

Nell'immediato verificarsi di un evento si assiste ad un incremento di domanda assistenziale a cui le strutture ospedaliere devono far fronte (Figura 1.1). Nei giorni successivi c'è un continuo afflusso di feriti gravi salvati dalle macerie degli edifici. Questa richiesta massiva di soccorso va poi diminuendo e ritornando ad una condizione di normalità trascorsi i primi sette giorni dall'evento (WHO & NSET, 2004).

Gli ospedali sono strutture molto complesse che svolgono un gran numero di funzioni. Oltre a fornire cure mediche, essi funzionano anche come ufficio per il personale medico e di amministrazione,

Capitolo 1 - Introduzione

laboratorio e magazzino. Sono strutture strategiche che dovrebbero rimanere pienamente operative a seguito di eventi calamitosi, quali i terremoti. Tuttavia, gli ospedali italiani sono costruiti in base a codici di progettazione obsoleti e spesso non soddisfano i requisiti di sicurezza richiesti.

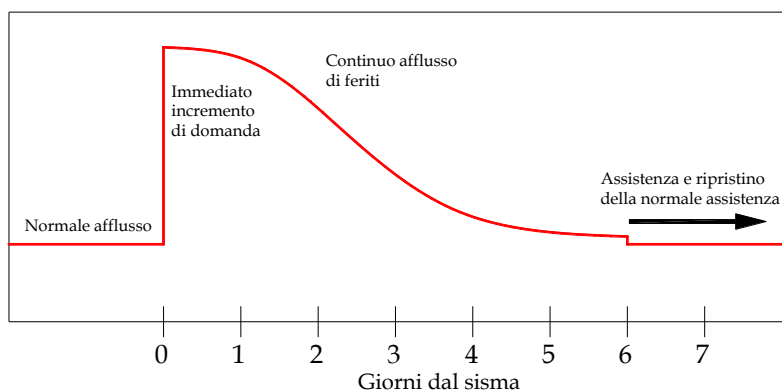


Figura 1.1 - Domanda di assistenza medica a seguito di un evento sismico (adattato da WHO & NSET, 2004).

Il PAHO Disaster Mitigation Advisory Group ha definito l'"ospedale sicuro" come una struttura i cui servizi rimangono ampiamente accessibili e funzionanti durante e subito dopo il verificarsi di un evento calamitoso (Pan American Health Organization, 2008). Essi hanno anche osservato che, dopo un terremoto, gli ospedali sono raramente fuori servizio a causa di danni strutturali: l'interruzione del servizio è più spesso conseguenza di guasti funzionali.

Dal momento che gli ospedali devono assicurare (Pan American Health Organization, 2008):

- protezione della vita di pazienti, visitatori e personale ospedaliero;
- protezione di attrezzature ed arredi;
- protezione nei confronti delle prestazioni della struttura ospedaliera;

una strategia di protezione efficace deve garantire non solo che l'ospedale non subisca danni strutturali in caso di terremoto, ma anche e soprattutto che offra i propri servizi senza interruzioni. Questo è fondamentale in particolare nel caso di terremoti frequenti, allorché i danni strutturali risultano lievi o assenti, ma la struttura ospedaliera manifesta interruzioni del servizio a causa di danni non strutturali o danni ad attrezzature ed impianti.

1.1 VULNERABILITÀ DELLE STRUTTURE

OSPEDALIERE

A seguito di tali osservazioni in merito alla funzione strategica delle strutture sanitarie e l'elevato rischio a cui sono soggette, si pone l'attenzione su come non sia sufficiente garantire la sola sicurezza strutturale ma sia indispensabile assicurare la piena operatività della struttura. Per consentire ciò è necessario considerare il ruolo fondamentale che rivestono i componenti non strutturali. Come emerso da esperienze passate, a seguito di un terremoto, le strutture sanitarie non assolvono alle loro funzioni anche per danni legati a componenti non strutturali, apparecchiature ed impianti. In uno studio

Capitolo 1 - Introduzione

condotto da Miranda & Taghavi (2003) sul danneggiamento dei vari componenti all'interno di varie tipologie strutturali è emerso come solo l'8% del costo è legato alla realizzazione della componente strutturale, mentre l'onere maggiore, il 48%, è legato agli elementi non strutturali, ed il 44% è relativo al contenuto (Figura 1.2).

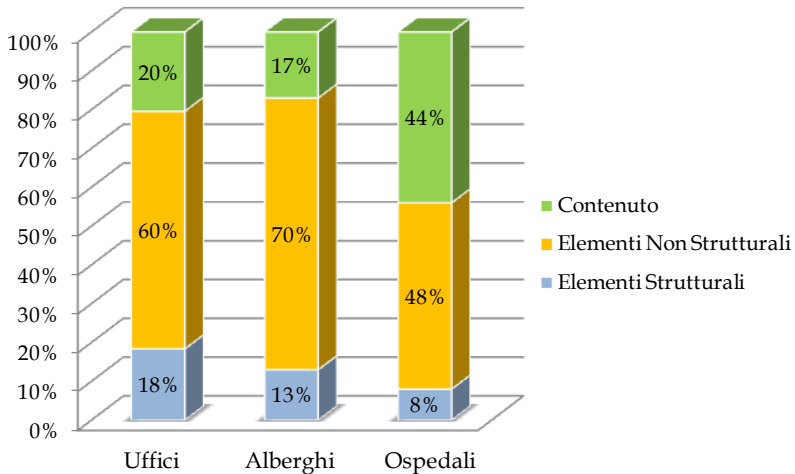


Figura 1.2 - Costi per la realizzazione degli ospedali (Miranda & Taghavi, 2003).

L'elevata complessità dettata dalle molteplici funzioni che la struttura ospedaliera deve svolgere, l'elevato livello di occupazione, la presenza di attrezzature ed impianti specifici rendono la struttura ospedaliera estremamente vulnerabile. Bisogna, pertanto, valutare la vulnerabilità di tali strutture tenendo conto non solo degli aspetti strutturali, ma anche di quelli non strutturali e amministrativi (Pan American Health Organization, 2008; World Health Organization - Regional Office for

Europe, 2006). È dunque indispensabile che la struttura sia in grado di resistere all'azione sismica e che le attrezzature e gli arredi non si danneggino, che le forniture vitali (acqua, elettricità, gas medicali, e così via) rimangano in servizio e che il personale sia in grado di fornire assistenza medica anche in condizioni di emergenza.

I fattori che rendono gli ospedali vulnerabili sono: (World Health Organization – Regional Office for Europe, 2006):

- complessità relativa al gran numero di funzioni compiute negli ospedali, che vanno dalla sanità all'amministrazione, al laboratorio, al magazzino e così via;
- alto livello di occupazione durante le 24 ore e la presenza di attrezzature mediche, gas potenzialmente pericolosi e attrezzature di supporto vitale che necessitano di alimentazione continua;
- alto livello di dipendenza da servizi pubblici e infrastrutture (energia elettrica, acqua, gas clinici, ossigeno, carburante, comunicazioni), e da forniture critiche (farmaci, stecche, bendaggi, e così via);
- presenza di attrezzature mediche pesanti (macchine a raggi X, generatori di backup, autoclavi e altra attrezzature specialistiche), che possono essere danneggiate da vibrazioni eccessive;
- presenza di materiali pericolosi che possono causare contaminazioni o addirittura danni e perdite di vite umane.

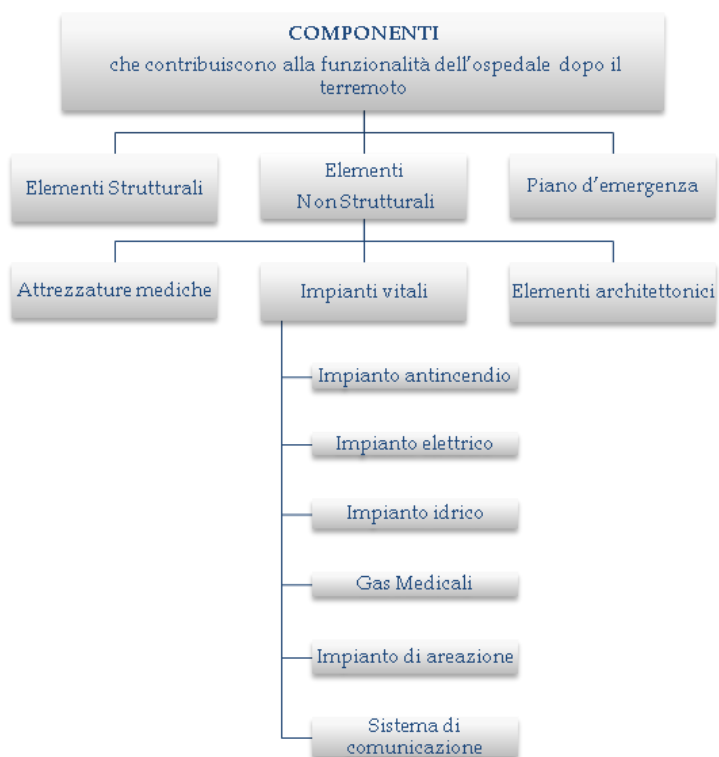


Figura 1.3 - Componenti di una struttura ospedaliera.

Da ciò e da quanto riportato in Figura 1.3 si evince come la vulnerabilità di una struttura ospedaliera sia legata alla componente strutturale e non strutturale presente al suo interno e alla gestione dell'emergenza da parte del personale della struttura e come attrezzature ed impianti rappresentino componenti critici della struttura ospedaliera.

Una prima ragione dell'importanza dei componenti non strutturali è legata, come visto in precedenza, al loro costo. In secondo luogo è emerso come una gran parte dei danni dei componenti non strutturali avviene per livelli di deformazione bassi e molto più piccoli dei livelli che portano in crisi la componente strutturale.

Da quanto emerso, la vulnerabilità di una struttura ospedaliera dipende da tre principali componenti:

- componente strutturale;
- componente non strutturale ed impiantistica;
- componente organizzativa.

Il fallimento di una delle tre categorie può essere responsabile del fallimento funzionale di una struttura ospedaliera.

1.1.1 Vulnerabilità della componente strutturale

Gli elementi strutturali dell'edificio hanno il compito di supportare i carichi verticali e quelli indotti dall'azione sismica. Tali componenti includono fondazioni, muri portanti, colonne, travi, scale, solai ed altre tipologie di elementi che supportano l'edificio durante il sisma. Il livello di vulnerabilità di tali componenti è influenzato dai seguenti fattori:

- la progettazione della struttura;
- la qualità dei materiali, la realizzazione della struttura e la sua manutenzione;
- la configurazione architettonica e strutturale.

Gli aspetti della progettazione in aree ad elevato rischio sismico è ormai oggetto di molteplici normative a carattere nazionale ed internazionale che, per le strutture strategiche, sono improntate sul mantenimento della funzionalità a seguito di eventi sismici. Tuttavia, i codici normativi per la componente strutturale non possono garantire che gli ospedali rimangano operativi a seguito di terremoti, poiché molti altri fattori influenzano la funzionalità delle strutture sanitarie.

1.1.2 Vulnerabilità della componente non strutturale ed impiantistica

Danni a componenti non strutturali, guasti a linee per servizi pubblici e ad aspetti organizzativi delle funzioni ospedaliere, sono altrettanto pericolosi per la sicurezza dei pazienti al pari dei danni strutturali. Nelle strutture moderne, i danni non strutturali sono, spesso, la causa principale di interruzione del servizio sanitario a seguito di eventi sismici. Ad esempio, durante il terremoto di Nisqually del 2001, la maggior parte degli edifici non ha subito danni strutturali importanti, ma il danno di elementi non strutturali ha significato che molti edifici non erano operativi (Filiatrault et al., 2001).

La complessità degli elementi non strutturali negli ospedali moderni è dovuta dalla presenza di estese reti di impianti meccanici, elettrici e di tubazioni indispensabili per assolvere funzioni essenziali. I sistemi di aria condizionata, aspirazione e ventilazione sono molto importanti per mantenere un gradiente di pressione appropriato in diverse aree; un malfunzionamento in qualsiasi parte del sistema potrebbe causare

un rischio di infezioni per pazienti e personale. Questo sistema, come altri impianti ed apparecchiature, è estremamente vulnerabile alle azioni sismiche.

I danni ai componenti non strutturali possono verificarsi anche per bassi livelli di azione sismica. Ad esempio, i muri di ripartizione subiscono danni per drift di piano molto inferiori a quelli che possono causare danni strutturali. Similmente, alti livelli di accelerazione associati a piccoli drift di piano possono causare danni a controsoffitti e tubature arrecando piccoli o nulli stati di danneggiamento a componenti strutturali.

Se il danno è abbastanza grave, è necessaria l'evacuazione dei pazienti, situazione che diventa critica per le persone in terapia intensiva.

Le reti di distribuzione principali come rete elettrica, idrica e delle telecomunicazioni sono servizi critici da cui dipende l'operatività di una struttura ospedaliera. Sono reti esterne che spesso subiscono danni a seguito di terremoti. Al fine di mitigare gli effetti secondari come esplosioni ed incendi, sono previsti spegnimenti automatici di cabine elettriche e linee del gas. A seguito di tali spegnimenti vengono tagliati i servizi agli ospedali, i quali devono far ricorso a sistemi tampone per consentire il corretto funzionamento di apparecchiature ed impianti non direttamente danneggiati. Le prestazioni di queste unità di backup dipendono dall'integrità di ogni singolo componente come batterie, condutture e collegamenti elettrici.

Capitolo 1 - Introduzione

I componenti non strutturali principali che influenzano l'operatività delle strutture ospedaliere, come indicati dalla normativa italiana (NTC, 2008) sono riportati in Tabella 1.1.

| COMPONENTE | VULNERABILITÀ | IMPORTANZA |
|---|---------------|--------------|
| Gas per uso medico | | |
| Serbatoi di ossigeno | Alta | Alta |
| Bombole di azoto | Molto Alta | Alta |
| Impianto elettrico di emergenza | | |
| Batterie per la corrente elettrica d'emergenza | Molto Alta | Alta |
| Generatore della elettrico d'emergenza | Alta | Alta |
| Batterie per i generatori di corrente elettrica d'emergenza | Media | Alta |
| Ascensori | | |
| Guide dell'ascensore | Molto Alta | Alta |
| Motori e generatori dell'ascensore | Medio - alta | Alta |
| Pannelli elettrici e di controllo dell'ascensore | Variabile | Alta |
| Apparecchiature e rifornimenti medici | | |
| Scaffali per stoccaggio di medicinali e altri importanti materiali medici di scorta | Alta | Alta |
| Apparecchiature mediche | Variabile | Alta |
| Componenti fissati a pavimento o sul tetto | | |
| Caldaie | Media | Medio - alta |
| Cabine contenenti i trasformatori elettrici | Bassa | Alta |
| Tipici componenti da installarsi sul pavimento o sul tetto montati su isolatori per le vibrazioni | Medio - alta | Media |

| COMPONENTE | VULNERABILITÀ | IMPORTANZA |
|---|---------------|---------------|
| Tipici componenti o serbatoi fissati al pavimento o installati sul tetto con un rapporto di ribaltamento >1.6, componenti soggetti al ribaltamento | Alta | Media |
| Tipici componenti o serbatoi fissati al pavimento o installati sul tetto con un rapporto di ribaltamento tra 1 e 1.6. | Medio | Medio |
| Tipici componenti o serbatoi fissati al pavimento o installati sul tetto con un rapporto di ribaltamento < 1 | Media | Media |
| Sistema di distribuzione | | |
| Tubature sospese nei sistemi critici con un diametro nominale >200 mm e su attacchi lunghi più di 500 mm | Media | Alta |
| Tubature sospese di diametro nominale >100 mm e attacchi lunghi più di 300 mm | Medio - bassa | Medio - alta |
| Condotto per gli impianti di riscaldamento, ventilazione, e condizionamento d'aria | Bassa | Medio - alta |
| Componenti dell'impianto elettrico come condotti contenenti i cavi e piattaforme di sostegno dei condotti per la distribuzione dell'energia elettrica | Bassa | Media |
| Componenti architettonici | | |
| Soffitto sospeso o a pannelli | Bassa | Medio - bassa |
| Lampadari su controsoffitti | Bassa | Media |

Capitolo 1 - Introduzione

| COMPONENTE | VULNERABILITÀ | IMPORTANZA |
|---|---------------|------------|
| Tamponamenti interni non armati in muratura | Media | Media |
| Muri esterni di mattoni non rinforzati | Media | Media |
| Sostanze pericolose | | |
| Tamponamenti e altri componenti in aree con materiale biologico o infettivo | Variabile | Alta |
| Aree con stoccaggio o uso di materiale pericolosi di tipo chimico, nucleare o biologico | Variabile | Alta |

Tabella 1.1 - Elementi non strutturali presenti all'interno di una struttura ospedaliera con indicazione del livello di vulnerabilità ed importanza (NTC, 2008).

A seguito di eventi simili anche la fornitura di prodotti chimici, prodotti farmaceutici, ossigeno e gas medicali può essere compromessa e, quindi, l'operatività di una struttura ospedaliera dipende anche dalla capacità di stoccaggio e dalla rete interna per la fornitura ai reparti.

1.1.3 Vulnerabilità della componente organizzativa

Nel caso di interruzione della normale movimentazione del personale e dei pazienti e del normale funzionamento di attrezzature ed impianti, i piani operativi per la gestione dell'emergenza svolgono un ruolo importante per la continuità operativa. Il piano di emergenza degli ospedali deve identificare i rischi per ciascun evento ed integrare il proprio piano con quello a livello di comunità, nominare un

responsabile per il coordinamento e assicurare il trattamento dei feriti a seguito di un evento.

Una non corretta pianificazione dell'emergenza e gestione del rischio può provocare il danneggiamento di uno dei componenti menzionati nel paragrafo precedente. È compito dell'ambiente organizzativo attenuare il rischio di danneggiamento dei componenti fisici che possono compromettere le funzioni ospedaliere.

1.2 MONITORAGGIO DI STRUTTURE OSPEDALIERE

Come visto, la sicurezza di edifici strategici come le strutture ospedaliere è solo parzialmente legata alla performance degli elementi strutturali principali. Infatti, i recenti terremoti in Italia e nel mondo hanno evidenziato come numerosi edifici ospedalieri hanno perso la loro funzionalità in conseguenza di un terremoto, sebbene non fossero affetti da danni alle strutture ma solamente alle parti non strutturali e/o alle attrezzature. Risulta necessario adottare opportune strategie di protezione sismica per tali struttura. C'è però da riscontrare che, l'attuale impianto normativo italiano (NTC 2008) ed europeo (EC8) fornisce indicazioni limitate per strutture strategiche come gli ospedali. Se da un lato è richiesto di tenere in considerazione non solo i componenti strutturali, dall'altro sono limitate le specifiche per la quantificazione della capacità dei "componenti essenziali" degli ospedali.

Capitolo 1 - Introduzione

Le apparecchiature elettro-meccaniche e mediche, i serbatoi ed i sistemi di distribuzione, di riscaldamento, di ventilazione e condizionamento, ascensori e sistemi di alimentazione hanno un ruolo predominante nella gerarchia della sicurezza nei confronti delle prestazioni di elementi strutturali. Ciò induce a sviluppare specifiche strategie di analisi e monitoraggio finalizzate alla valutazione, praticamente in tempo reale, delle relative condizioni.

Gli obiettivi che una strategia di monitoraggio deve perseguire sono:

- la definizione di un approccio standardizzato e oggettivo per valutare le condizioni e le prestazioni di un ospedale colpito da un terremoto, in modo da stabilirne l'operatività immediatamente a seguito di un evento sismico;
- la definizione di adeguate contromisure per migliorare la sicurezza nell'ospedale in base alle informazioni raccolte dal monitoraggio continuo dello stesso;
- il supporto alla gestione delle emergenze e alla riduzione del rischio.

Pertanto, una rapida valutazione dello stato di salute dei vari elementi che compongono una struttura ospedaliera a seguito di un terremoto, l'identificazione e la localizzazione di eventuali danni in tempo reale svolgono un ruolo fondamentale nel miglioramento delle condizioni di sicurezza della struttura.

I metodi sperimentali di identificazione del danno (in particolare, quelli basati sulle vibrazioni) sono particolarmente efficaci per valutare

le prestazioni e lo stato di strutture e sistemi in condizioni di esercizio. Algoritmi di identificazione del danno vengono continuamente sviluppati e migliorati dalla comunità scientifica internazionale. I sistemi di monitoraggio basati sulle vibrazioni possono certamente fornire utili e, soprattutto, oggettive informazioni sulla presenza e la localizzazione di danni in un sistema ed aiutare le autorità preposte alla gestione dell'emergenza nel determinare quali sistemi, componenti e/o servizi hanno urgente bisogno di intervento. Il monitoraggio continuo, anche in condizioni operative, può aiutare anche a pianificare adeguatamente gli interventi di manutenzione, classificandone le priorità sulla base della tipologia e la localizzazione del danno identificato.

1.3 STRUTTURA DELLA TESI

L'obiettivo del presente documento consiste nell'illustrazione delle opportunità offerte da un sistema di monitoraggio per la caratterizzazione strutturale e non strutturale di ospedali situati in zone a rischio dal punto di vista sismico. L'attenzione è focalizzata sulla messa a punto di una metodologia in grado di coprire le esigenze di conoscenza e manutenzione, monitorando parametri fisici rilevanti e sfruttando i più recenti sviluppi nel campo dell'acquisizione, elaborazione e trasmissione dei dati, per il monitoraggio di componenti strutturali e non strutturali.

Il lavoro di tesi di seguito pertanto è organizzato nel seguente modo:

Capitolo 1 - Introduzione

- nel **capitolo 2** sono esaminate ed individuate le vulnerabilità di componenti strutturali e non strutturali, di impianti ed attrezzature medicali, riportandone i tipici stati di danneggiamento a seguito di eventi sismici passati. Verrà anche eseguita una classificazione di tali componenti;
- nel **capitolo 3**, con riferimento ai risultati di vulnerabilità dei vari componenti, sono definite le grandezze fisiche da monitorare per ciascun componente e capaci di definirne lo stato di salute. Sarà, quindi, trattata la progettazione di un sistema di monitoraggio per una struttura ospedaliera smart “Smart Health Facility” (SHF), dopo aver analizzato lo stato dell'arte dei sistemi di monitoraggio installati nel mondo. Altresì, verrà proposto un layout di monitoraggio ed individuato l'hardware che meglio si presta alle esigenze richieste e che il mercato e le tecnologie odierne offrono;
- nel **capitolo 4** sono esaminate differenti procedure per l'identificazione del danno per sistemi di monitoraggio basati sulle vibrazioni, individuando gli indici maggiormente sensibili a stati di danneggiamento. Approcci basati su analisi statistiche saranno, poi, discussi per la rimozione dei fattori ambientali ed operativi presenti nelle misure;
- nel **capitolo 5** saranno esaminati casi studio per quanto riguarda la componente strutturale e non strutturale. Viene

discussa l'installazione di un sistema di monitoraggio strutturale in continuo presso il Presidio Ospedaliero "A. Cardarelli" di Campobasso. Sulla base dei dati raccolti dal sistema, sarà sviluppata una procedura per l'identificazione del danno a seguito di eventi sismici a partire dalla misura delle vibrazioni della struttura. Tale procedura sarà prima validata con la simulazione di stati di danneggiamento applicati alle serie temporali delle frequenze naturali stimate e successivamente applicata ai dati raccolti dal sistema di monitoraggio in concomitanza di eventi sismici.

Mentre, in merito ai componenti non strutturali sono illustrati i risultati di prove sperimentali per la caratterizzazione dinamica di un distributore per medicinali ed un serbatoio per lo stoccaggio dei liquidi. Del primo sarà valutata la risposta alle vibrazioni a quote differenti dell'edificio, mentre, del secondo sarà eseguita la caratterizzazione dinamica considerando differenti livelli di riempimento e condizioni di vincolo. Le prove eseguite su tali componenti forniranno indicazioni all'implementazione di sistemi di monitoraggio;

- nel **capitolo 6** sono riassunti i risultati ottenuti e suggerite future ricerche nel campo del monitoraggio di complessi ospedalieri.

CAPITOLO 2

RISPOSTA SISMICA

DELLE STRUTTURE

OSPEDALIERE ESISTENTI

Sebbene i terremoti danneggino la maggior parte delle strutture create dall'uomo in modi simili, per comprendere le vere conseguenze dei danni agli edifici con speciali occupazioni e funzioni, come gli ospedali, è necessaria una descrizione del danno più dettagliata ed accurata di quella necessaria per gli altri edifici. Gli effetti del danno da terremoto sulle strutture ospedaliere sono stati descritti in seguito, sulla base di esperienze di ospedali europei e del resto del mondo.

Storicamente, gli edifici sono stati progettati per fornire un'adeguata protezione alla vita degli occupanti. Per la maggior parte degli edifici, la sicurezza della vita è minacciata dal crollo dell'edificio o dai detriti che cadono nelle strade. Mentre, per affrontare problemi di sicurezza all'interno di strutture sanitarie è necessario esaminare un livello più

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

alto di prestazioni, poiché i pazienti hanno una mobilità limitata e dipendono dal personale sanitario e inoltre per l'elevato numero di attrezzature mediche specializzate presenti. Oltre a preservare l'incolumità delle persone presenti all'interno dell'ospedale è necessario garantire che esso possa fornire assistenza sanitaria anche dopo un evento sismico, quindi, non manifestando danni alla componente strutturale e non strutturale, impiantistica e ad apparecchiature mediche.

In Figura 2.1 sono mostrati i componenti tipici di una struttura ospedaliera. Gli elementi strutturali sono costituiti da fondazioni, pilastri, pareti, travi, muri portanti e controventi che devono assorbire i carichi verticali gravitazionali e quelli orizzontali da vento e, in particolar modo, le azioni sismiche. Gli elementi non strutturali includono gli elementi architettonici, contenuti ed impianti. Gli elementi architettonici sono elementi che completano l'edificio nonostante non facciano parte del sistema resistente, tra essi ricadono i controsoffitti, i parapetti e le tamponature. In merito alle tamponature, tuttavia, si rende necessario un discorso più approfondito in quanto, nonostante vengano generalmente considerate come elementi non strutturali, numerosi studi hanno dimostrato la loro influenza sulle performance sismiche degli edifici in c.a. (Perrone et al. 2016, Ricci et al. 2013). Anche gli elementi impiantistici sono parte integrante dell'edificio e sono indispensabili per la sua funzionalità, come ad esempio l'impianto elettrico ed idrico, gli impianti antincendio, di riscaldamento e condizionamento. Tra gli impianti di una struttura

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti
ospedaliera vi sono gli impianti per i gas medicali che risultano indispensabili all'assistenza sanitaria. Infine, per ciò che riguarda i contenuti, essi sono costituiti prevalentemente dall'arredamento interno, apparecchiature medicali, armadietti e scaffalature per lo stoccaggio dei medicinali.

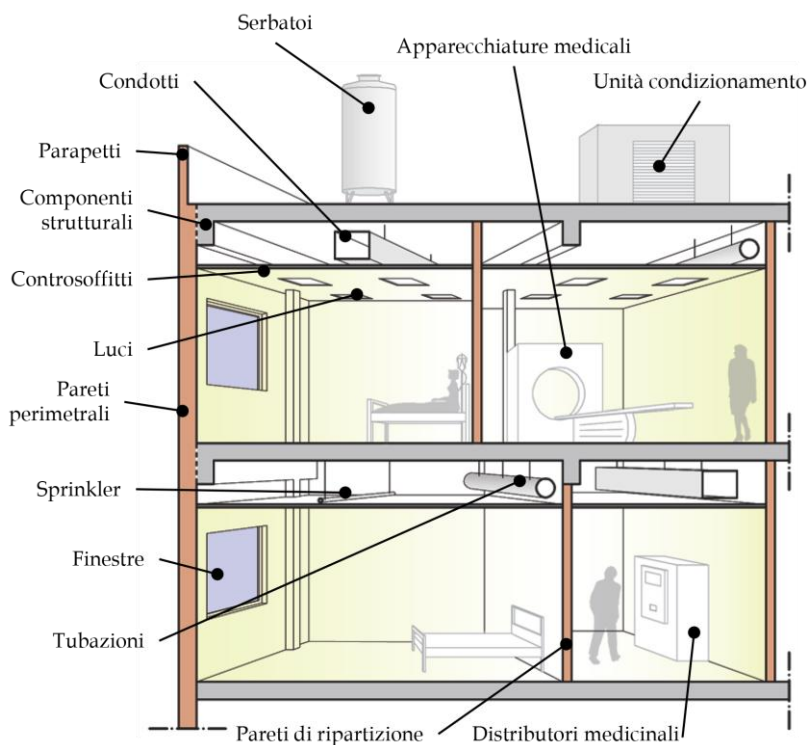


Figura 2.1 - Elementi strutturali e non strutturali presenti un edificio ospedaliero.

Nonostante gli elementi non strutturali non facciano parte del sistema portante dell'edificio, anch'essi sono soggetti ad azioni dinamiche in

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

caso di eventi sismici. Per tale motivo, gli elementi architettonici, così come gli elementi impiantistici e tutte le componenti non strutturali, devono essere progettati per resistere alle azioni sismiche di progetto al pari degli elementi strutturali. I numerosi eventi sismici che hanno colpito negli ultimi anni il mondo intero hanno messo in evidenza come danni strutturali hanno compromesso l'uso delle strutture, ma soprattutto è stato osservato come i danni negli elementi non strutturali superino spesso di gran lunga i danni occorsi alle strutture, anche per bassi livelli di azione sismica.

2.1 TIPICI DANNI DI COMPONENTI STRUTTURALI

Quando si verifica lo scuotimento del terreno a seguito di un evento sismico, questo viene trasferito alla struttura provocandone potenziali danni. I danni possono consistere nella fessura di pareti portanti in muratura, pareti, colonne e travi per strutture in cemento o rottura dei collegamenti per strutture in acciaio.

I danni possono variare da lievi, dove solo alcune lesioni sono visibili, ad importanti, in cui porzioni di struttura sono inefficaci e pericolose, fino al completo collasso dell'edificio. Tipicamente le cause dei danni strutturali sono una progettazione inadeguata, una scarsa qualità dei materiali e una non corretta realizzazione dell'opera. Anche un'insufficiente manutenzione è causa di una performance non adeguata della struttura.

Danni che si sono verificati in terremoti passati hanno messo in evidenza come una non corretta distribuzione delle rigidità in pianta

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti ed in elevazione ha causato il crollo della struttura. Come quanto manifestato dall'Olive View Hospital durante il terremoto di San Fernando del 1971, quando, a causa di discontinuità in elevazione, la struttura ha manifestato un meccanismo di collasso per piano soffice (Figura 2.2).



Figura 2.2 - Collasso del primo livello dell'Olive View Hospital (FEMA, 2007).

Altri tipi di danni strutturali si sono rilevati per rottura a taglio di pareti o colonne. Spesso, queste sono inglobate in murature di tamponamento non continue lungo tutto lo sviluppo longitudinale della colonna, creando così elementi tozzi (Figura 2.3).



Figura 2.3 - Danni alle colonne del Barrington Medical Building (Faison et al., 2004).

2.2 TIPICI DANNI DI COMPONENTI NON-STRUTTURALI

Nell'istante in cui si verifica un evento sismico il terreno scuote la struttura, che a sua volta eccita tutto ciò che vi contiene. Questo può danneggiare direttamente i componenti presenti all'interno, oppure, in maniera indiretta i componenti che sono collegati alla struttura possono subire danneggiamenti a causa della deformazione strutturale tra i diversi piani. I danni che si possono verificare agli elementi architettonici sono costituiti da rottura alle finestre, pareti esterne o pareti di ripartizione interna, parapetti e cornicioni. In casi estremi le

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti
pareti divisorie interne e le pareti esterne possono subire dei ribaltamenti. Anche i controsoffitti risultano estremamente vulnerabili alle azioni sismiche e possono rompersi e cadere sul pavimento. Danni a impianti possono consistere nello scorrimento o nel ribaltamento di caldaie, generatori o ventole, o nella rottura di condotte.

A causa dell'elevata varietà di contenuti ed attrezzature che è possibile trovare all'interno di una struttura ospedaliera, il tipo di danno di tali sistemi può variare notevolmente. Ad esempio, attrezzature mediche come tavoli e luci di sale operatorie, macchine per raggi X e TAC, sterilizzatori e monitor, sono spesso pesanti e non ben ancorati alla struttura. Uffici e magazzini come le aree utilizzate per lo stoccaggio di forniture critiche, medicinali, prodotti chimici e carburante, possono essere gravemente danneggiati dallo scuotimento.

Come è riscontrabile, molteplici sono i danneggiamenti che possono verificarsi ai componenti non strutturali e, quindi, causare l'interruzione dell'assistenza sanitaria. Di seguito si riportano i tipici danneggiamenti dei principali componenti non strutturali, differenziati tra componenti architettonici, macchinari e impianti ed apparecchiature mediche, a seguito di un evento sismico.

2.2.1 Componenti architettonici

2.2.1.1 Controsoffitti e fonti di illuminazione

Il controsoffitto presenta una struttura di travi a reticolo per il supporto di pannelli. Sono sospesi al soffitto soprastante e poggiano sul perimetro dell'ambiente in cui è collocato.

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

L'oscillazione del reticolo di travi durante un sisma può provocare l'apertura di spazi tra i supporti che possono causare la caduta di pannelli e lampadari (Figura 2.4). Il collasso dell'intera maglia di supporto è spesso causato dal carico addizionale dovuto ai lampadari non ancorati alla struttura. Altri tipi di danni riscontrati sono dovuti al martellamento in corrispondenza della sommità delle partizioni e degli sprinkler.



Figura 2.4 - Danni alla controsoffittatura nel reparto di degenza (FEMA, 2012).

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

Incassate nei controsoffitti o ancorate tramite catene ai soffitti vi sono le lampade. Queste, a causa delle oscillazioni indotte dal moto sismico, incontrando degli ostacoli o i muri perimetrali dei locali, possono rompersi facendo rovinare a terra frammenti di vetro. Oppure a causa di sistemi di sospensione inadeguati, tutto il sistema di illuminazione può cadere a terra (Figura 2.5)(Linee Guida Reluis, 2009).



Figura 2.5 - Danneggiamento del sistema di illuminazione (Linee Guida Reluis, 2009).

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

2.2.1.2 Pareti di ripartizione

Generalmente i muri di ripartizione interni subiscono danni che interessano solamente la parte superficiale e quindi l'intonaco, ma per eventi di maggiore entità anche il pannello può subire danneggiamenti. I danni sono localizzati negli angoli delle porte o in corrispondenza del soffitto. Danni più significativi possono causare il completo ribaltamento della parete, come accaduto durante il terremoto del Cile nel 2010 (Figura 2.6). La rottura di pareti può causare a sua volta il danneggiamento di tubazioni o altri impianti che vi passano all'interno.



Figura 2.6 - Ribaltamento di un muro di ripartizione presso il Santiago General Hospital in Cile (Fierro et al., 2011).

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

Oltre a pareti divisorie di modeste dimensioni è possibile trovare, all'interno di una struttura ospedaliera, pareti con spessori maggiori. Queste sono spesso utilizzate per la compartimentazione antincendio o nella separazione di locali con maggiore rischio di radiazioni. Sebbene sono elementi non strutturali assumono un ruolo importante nella risposta dell'edificio al sisma.



Figura 2.7 - Danno ad una parete utilizzata per il supporto di tubature per l'antincendio (FEMA, 2012).

Queste pareti sono sensibili alle deformazioni della struttura e possono subire danneggiamenti nel piano e fuori piano a meno che non siano isolate dal telaio strutturale o dispongano di ritegni che ne evitino il

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

ribaltamento. I detriti provenienti dalla rottura delle pareti possono ostruire le uscite di emergenza ed essere particolarmente pericolosi nei vani scala e nei vani ascensore.

Se le partizioni sono utilizzate come supporto laterale per tubazioni, armadi elettrici, scaffali di stoccaggio o altri elementi non strutturali, l'avaria della parete divisoria potrebbe provocare danni a questi ultimi componenti (Figura 2.7).

2.2.1.3 *Pareti esterne*

Per le pareti esterne vale quanto detto nel paragrafo precedente in merito alle pareti di elevato spessore usate nella ripartizione interna.

Le facciate delle pareti esterne sono tipicamente rivestite di materiali sottili come piastrelle, pietre, terracotta o piastrelle in ceramica che sono attaccati al substrato di supporto mediante resina adesiva. Queste sono generalmente sensibili alle deformazioni nel piano e fuori piano e possono incrinarsi o deformarsi a causa delle deformazioni del pannello murario sottostante. A causa dell'accelerazione subita dal sisma il rivestimento potrebbe staccarsi se la resina adesiva risulta deteriorata a causa di fenomeni di degrado.

I rivestimenti delle pareti perimetrali possono essere anche ancorati. Sono generalmente costituiti da pietre fissate alla struttura a mezzo di ritegni meccanici che devono essere progettati accuratamente. In questa categoria di rivestimento rientrano anche i pannelli prefabbricati che sono collegati alla struttura principale. Possono

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti
essere pannelli metallici leggeri, pannelli in calcestruzzo o pietre e piastrelle supportati da strutture in acciaio.

Tali pareti di rivestimento e le loro connessioni possono subire danneggiamenti a causa di forze inerziali e deformazioni della struttura. Particolarmente vulnerabili sono le pareti situate in prossimità delle aperture o negli angoli degli edifici.

Le connessioni rigide possono rompersi se non sono sufficientemente flessibili da adattarsi al drift di piano e, quindi, causare il danneggiamento della parete (Figura 2.8). Deterioramento o corrosione dei collegamenti meccanici sono, spesso, causa prematura della rottura della parete di rivestimento.



Figura 2.8 - Danneggiamento degli ancoraggi di un pannello prefabbricato con conseguente caduta a terra (FEMA, 2012).

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

2.2.1.4 Pareti vetrate

Sempre più comuni sono le pareti vetrate di edifici che, a causa di eventi sismici, possono rappresentare un significativo rischio per gli occupanti.



Figura 2.9 - Danneggiamento superficie vetrata (FEMA, 2012).

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

Le grandi superfici vetrate sono sensibili alle accelerazioni e alle deformazioni con danneggiamenti nel piano e fuori piano. Risultano particolarmente vulnerabili in strutture flessibili in cui si hanno grandi spostamenti di interpiano.

Le prestazioni delle pareti vetrate durante gli eventi sismici possono ricadere in quattro categorie:

- il vetro rimane intatto nel suo telaio o ancoraggio;
- il vetro si spezza nel telaio o negli ancoraggi, ma assolve sempre la funzione di protezione contro le intemperie;
- il vetro si frantuma ma rimane in posizione precaria nel telaio negli ancoraggi e risulta suscettibile di caduta;
- il vetro si frantuma e cade fuori dal telaio o dagli ancoraggi (Figura 2.9).

2.2.1.5 *Parapetti e appendici*

I parapetti in muratura e le appendici rappresentano un rischio significativo di caduta, infatti sono stati causa di numerosi infortuni e costose riparazioni durante eventi sismici passati.

Solitamente i parapetti non fissati subiscono ribaltamenti fuori piano e possono portare con sé anche porzioni di tamponatura sottostante. Cadendo possono causare danni a cose (Figura 2.10) e persone. Il ribaltamento può avvenire sia verso l'esterno che l'interno e in quest'ultimo caso può far collassare eventuali solai di copertura leggeri.



Figura 2.10 - Ribaltamento di un parapetto con conseguente danneggiamento di auto in sosta (FEMA, 2012).

2.2.1.6 Scale

Le scale, che consentono il collegamento tra i differenti piani di una struttura, possono essere indipendenti da essa o integrate. Rappresentano un elemento essenziale della struttura che deve rimanere integro per consentire l'evacuazione dello stabile.

Durante un evento sismico le scale devono consentire lo spostamento relativo tra due piani adiacenti. È maggiormente probabile che il danneggiamento si verifichi in edifici flessibili che in edifici rigidi. Quando la scala è connessa rigidamente ad entrambi i livelli della struttura cercherà di comportarsi come rinforzo diagonale e, quindi, potrebbe subire danneggiamenti (Figura 2.11).

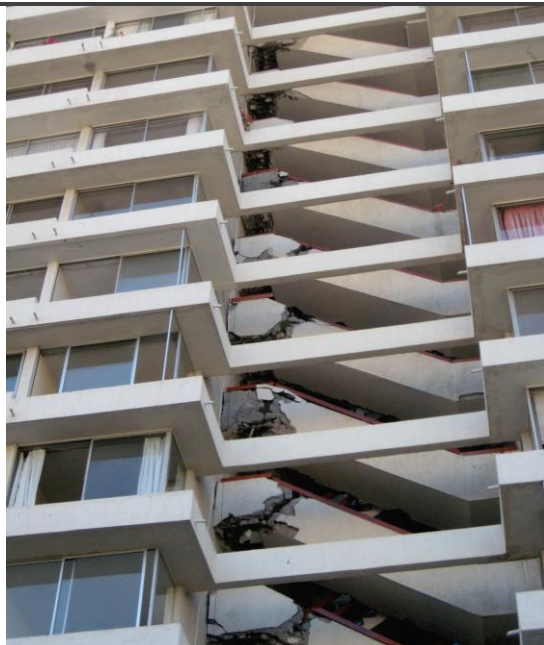


Figura 2.11 - Danneggiamento di scale (FEMA, 2012).

2.2.2 Componenti meccanici, elettrici ed impianti

2.2.2.1 Ascensori

All'interno di un ospedale gli ascensori assolvono il ruolo fondamentale per la movimentazione dei pazienti tra i vari reparti. Questi impianti elevatori hanno manifestato criticità a seguito di eventi sismici passati. Molte volte un ascensore può non funzionare a causa di guasti meccanici o perdite di potenza. I controller, i motori, i moto generatori, gli stabilizzatori ed i loro supporti e ancoraggi sono i componenti che spesso subiscono danni a seguito di un evento

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

sismico. I cavi possono attorcigliarsi ed avvolgere i componenti. I danni ad ascensori idraulici possono riguardare pompe dell'olio, serbatoi o tubazioni. Questi componenti possono spostarsi o cadere, rompendo tubazioni e causando perdite d'olio.

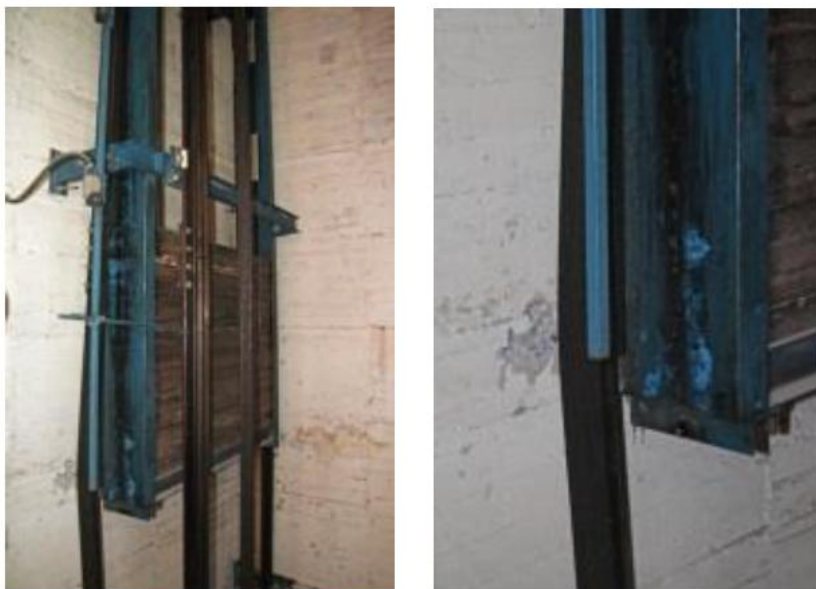


Figura 2.12 - Danni alle rotaie causati dal deragliamento dei contrappesi (FEMA, 2012).

I danni più gravi tendono a coinvolgere le pareti del vano ascensore o i contrappesi. La rottura dell'intonaco è tipica per eventi moderati, mentre, quando lo scuotimento si intensifica i danni incrementano provocando la caduta di mattoni o altri detriti provenienti dalle pareti, danneggiando o bloccando la cabina. Anche i contrappesi possono

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti
danneggiarsi uscendo dalle guide rovinando le pareti della cabina o le pareti del vano ascensore e, talvolta, possono aggrovigliarsi con i cavi dell'ascensore. Esempio del deragliamento dei contrappesi, verificatosi nell'ospedale in Chillan durante il terremoto del Cile nel 2010, è visibile in Figura 2.12.

2.2.2.2 *Generatori di emergenza*

I generatori di emergenza devono garantire un periodo di autosufficienza dell'impianto elettrico. Queste apparecchiature sono molto pesanti e producono rumore e vibrazione, per questo sono spesso collocate in ambienti dedicati. I macchinari sono collegati al terreno attraverso supporti isolatori che ne riducono le vibrazioni. Durante un evento sismico i supporti non sono in grado di resistere alle azioni taglianti, causando lo scivolamento o il ribaltamento del generatore (Figura 2.13). L'elemento è connesso rigidamente a derivazioni elettriche che subiscono strappi a causa del danneggiamento dei supporti, interrompendo istantaneamente l'approvvigionamento all'intero complesso. Inoltre le batterie, che spesso non risultano vincolate efficacemente alla struttura, subiscono ribaltamenti, interrompendo l'erogazione al generatore.

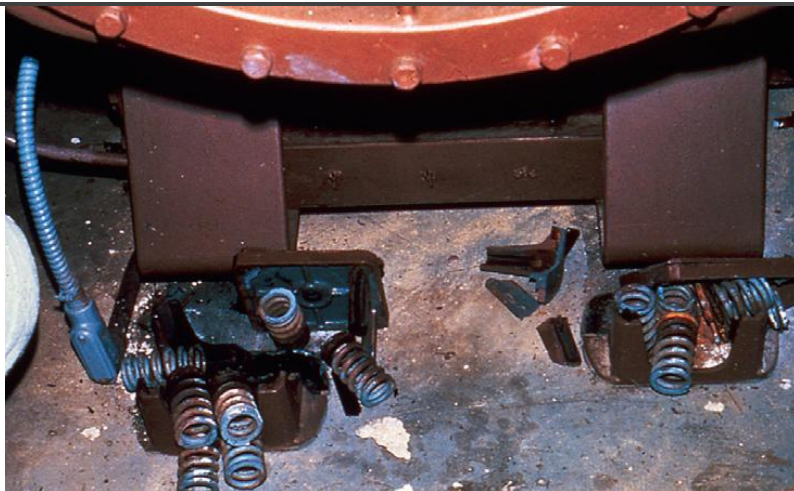


Figura 2.13 - Supporti di un generatore danneggiati a seguito di un sisma (FEMA, 2007).



Figura 2.14 - Batterie non opportunamente ancorate hanno subito un danneggiamento a seguito di un evento sismico (Miranda & Taghavi, 2003).

2.2.2.3 Caldaie, pompe e refrigeratori

Questa categoria comprende caldaie, pompe e refrigeratori. Si tratta di componenti ancorati, rigidamente o a mezzo di isolatori, al pavimento. Essendo apparecchiature molto pesanti l'ancoraggio è effettuato su piastre in cemento armato.

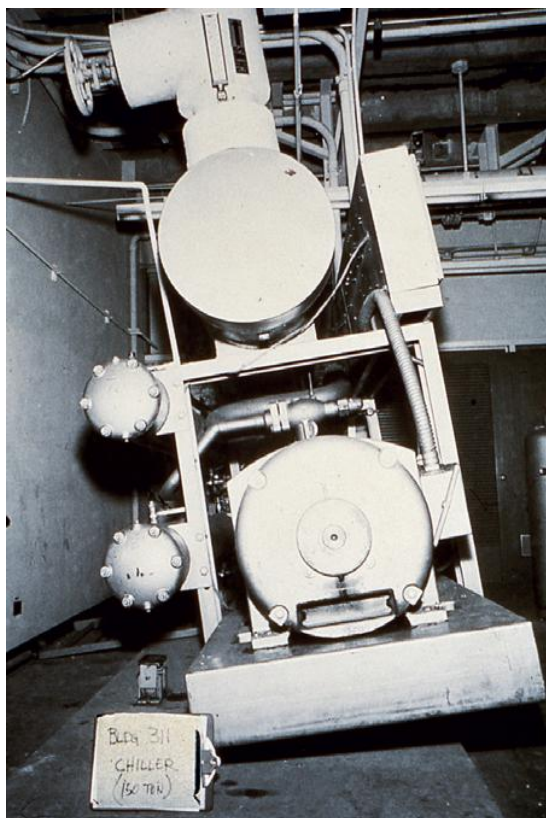


Figura 2.15 - Parziale ribaltamento di un refrigeratore (FEMA, 2007).

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

Il movimento dell'apparecchiatura a seguito di un evento sismico, oltre a causarne il ribaltamento o lo scivolamento (Figura 2.15), può causare la perdita di connessioni con linee di approvvigionamento carburante e di scarico, valvole di sicurezza, linee elettriche, tubazioni e condutture, con conseguente perdita di carburante e liquido refrigerante. Anche quando l'apparecchiatura è ben ancorata possono verificarsi danneggiamenti nelle connessioni con il macchinario.

Spesso le pompe sono ancorate rigidamente a blocchi di cemento che a loro volta non sono fissati adeguatamente alla struttura. A causa di questa connessione l'intero blocco può scivolare sulla struttura (Figura 2.16).



Figura 2.16 - Scivolamento di pompa e blocco in cemento (FEMA, 2012).

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

2.2.2.4 Impianti di riscaldamento, ventilazione e condizionamento

Gli impianti di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC) possono essere ancorati al pavimento con sistemi di isolamento delle vibrazioni o vincolati rigidamente nella parte esterna e con componenti isolati internamente oppure possono essere sospesi ai soffitti.



Figura 2.17 - Impianto HVAC posto al livello della copertura che ha manifestato il danneggiamento delle connessioni (FEMA, 2012).

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

Le apparecchiature isolate sono particolarmente vulnerabili in quanto le molle non hanno alcuna capacità di resistere alle azioni orizzontali. Gli isolatori tendono ad amplificare la risposta sismica dell'apparecchiatura e ciò richiede che i telai e le piastre di supporto abbiano una capacità di resistere alle azioni sismiche.



Figura 2.18 - Ribaltamento di unità di condizionamento (FEMA, 2012).

Componenti isolati internamente possono sperimentare forze sismiche sostanzialmente più grandi di quelle senza isolamento interno. Ciò si traduce in richieste più elevate sull'ancoraggio del componente, aumentandone la vulnerabilità al danno da scuotimento. Sia quelli isolati internamente che quelli isolati esternamente possono scivolare,

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti
inclinarsi, ribaltarsi o cadere come accaduto nel 2010 durante il terremoto del Cile (Figura 2.17 e Figura 2.18).

Gli impianti HVAC possono anche essere sospesi, quindi, a seguito di un evento sismico possono urtare con elementi strutturali, architettonici o altri oggetti meccanici o possono subire danneggiamenti a componenti interne. Questo è quanto accaduto al Holy Cross Medical Center in Sylmar durante il terremoto di Nothridge del 1994 (Figura 2.19).



Figura 2.19 - Pannelli di tamponamento danneggiati a causa dell'oscillazione dei componenti HVAC (FEMA, 2012).

Inoltre, a seguito di scuotimenti sismici, hanno subito danneggiamenti anche collegamenti con condutture per il carburante, condutture dell'acqua e linee elettriche.

2.2.2.5 Serbatoi

I serbatoi in pressione o pressione atmosferica, a sviluppo verticale ed orizzontale, realizzati in acciaio, acciaio inossidabile, polipropilene, plastica rinforzata o calcestruzzo vengono utilizzati per lo stoccaggio di liquidi e gas indispensabili alla funzionalità della struttura ospedaliera. Per capire l'importanza dei serbatoi è possibile menzionare, ad esempio, i serbatoi per lo stoccaggio di carburante necessario all'attivazione di generatori di emergenza o i serbatoi per i gas medicali o i serbatoio per l'impianto antincendio.



Figura 2.20 - Slittamento del serbatoio dal cordolo di supporto (FEMA, 2012).

Se il serbatoio non è ancorato o i supporti non sono adeguatamente progettati, può scivolare o ribaltarsi. In Figura 2.20 è mostrato il

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti
danneggiamento delle connessioni ed il successivo scivolamento del serbatoio posizionato al livello della copertura del Granada Hills Hospital durante il terremoto di Northridge del 1994 .

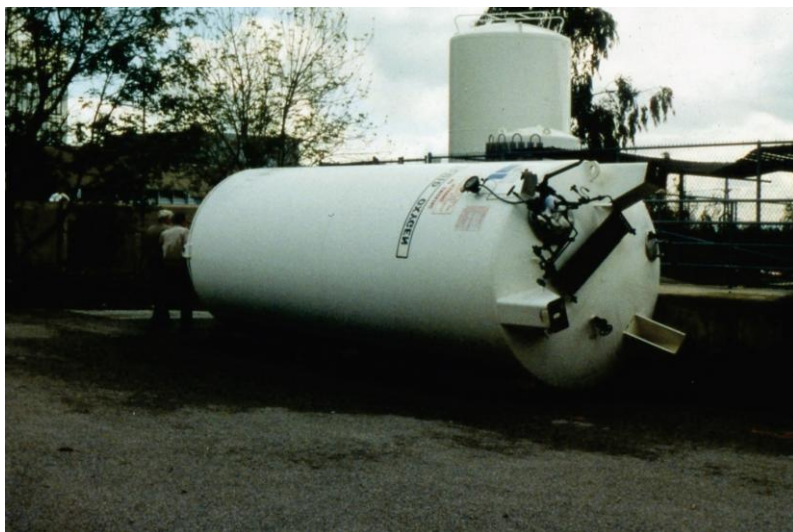


Figura 2.21 - Ribaltamento di un serbatoio verticale per inadeguatezza nelle connessioni (FEMA, 2012).

I serbatoi non adeguatamente ancorati possono danneggiare i supporti o le pareti. Le tipologie più comuni di danno sono:

- rottura dei bulloni di ancoraggio alla soletta in cemento armato (Figura 2.20);
- danneggiamento della saldatura tra i supporti del serbatoio e la piastra di base;
- inarcamento dei supporti;

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

- buckling o rottura locale della parete del serbatoio in corrispondenza dei supporti;
- rottura delle connessioni con conseguente ribaltamento o scorrimento e danneggiamento delle condutture (Figura 2.21).



Figura 2.22 - Danni a tubazioni a causa di un attraversamento in un solaio (FEMA, 2012).

2.2.2.6 Tubazioni

Le tubazioni all'interno di un ospedale sono utilizzate per il trasporto di fluidi e gas in pressione. Queste, se non supportate nel modo corretto, possono subire danneggiamenti. Risultano particolarmente

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti vulnerabili nelle giunzioni, raccordi, pieghe, attraversamenti di pareti e solai e alle connessione con i macchinari. Sono particolarmente sensibili alle deformazioni, soprattutto quando attraversano giunti strutturali e i vari impalcati, infatti, il loro movimento differenziale è la maggiore causa di danneggiamenti delle tubazioni (Figura 2.22).



Figura 2.23 - Rottura dei condotti dell'areazione (FEMA, 2012).

2.2.2.7 *Condotti dell'aria*

I condotti per il passaggio dell'aria durante un evento sismico possono subire spostamenti e/o cadute o causare la rottura delle giunzioni tra due o più condotti. Altri danni tipici dei condotti sono dovuti al danneggiamento dei supporti. Spesso, anche altre apparecchiature possono impattare sulla condotta causandone la rottura (Figura 2.23). Come accade anche per le tubazioni, l'attraversamento di giunti sismici senza adeguati giunti flessibili è causa di danneggiamento.



Figura 2.24 - Danneggiamento impianto sprinkler all'interno della controsoffittatura (FEMA, 2012).

2.2.2.8 *Impianto antincendio*

I danni più comuni degli impianti antincendio sprinkler a seguito di eventi sismici sono localizzati alle tubazioni, che subiscono danneggiamenti quando, a causa delle scuotimento, urtano altri componenti.

I punti in cui si localizzano i danni sono in corrispondenza degli erogatori sprinkler e nelle giunzioni filettate della tubazione. I danni più comuni sono quelli associati ai controsoffitti che, durante il moto sismico, urtano e danneggiano gli erogatori e le tubazioni (Figura 2.24).



Figura 2.25 - Danneggiamento dei supporti di serbatoi dell'impianto antincendio e conseguente rottura delle tubazioni (FEMA, 2012).

Oltre alle tubazioni, anche le pompe, i serbatoi di raccolta (Figura 2.25), i pannelli di controllo, i sensori di controllo, le apparecchiature

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti
per il rilevamento del fumo e le porte tagliafuoco hanno manifestato danneggiamenti a seguito di eventi sismici.

2.2.3 Apparecchiature medicali ed arredi

2.2.3.1 Lampade scialitiche

Molte lampade scialitiche presenti nelle sale operatorie non sono collegate al soffitto mediante supporti in grado di resistere alle azioni orizzontali e ciò ne causa la rottura a seguito di eventi sismici (Figura 2.26) e l'impossibilità di utilizzare la sala operatoria.



Figura 2.26 - Rottura braccio di una lampada scialitica (Rodgers et al.,2009).

2.2.3.2 X-ray e TAC

Tra le apparecchiature medicali necessarie alla funzionalità di una struttura ospedaliera rientrano i macchinari per i raggi X e TAC. Vista la loro configurazione, spesso, alta e stretta, possono rovesciarsi

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti durante un evento sismico. I loro bracci e le parti estese possono vibrare eccessivamente causandone il danneggiamento. Inutilizzazioni di macchine X-ray sono dovute anche al danneggiamento per effetto della caduta di altri componenti non strutturali.

Spesso, anche se le apparecchiature medicali non hanno riportato danni esteriori a seguito di eventi sismici, non sono state in grado di assolvere la loro funzione per danni a componenti interni. Achour et al. (2005) riporta come accelerazioni di 200/300 cm/s² hanno causato il danneggiamento dell'80% dei macchinari per la diagnosi ed il 40% dei macchinari per il trattamento durante il terremoto di Niigata-Ken Chuetsu del 2004.

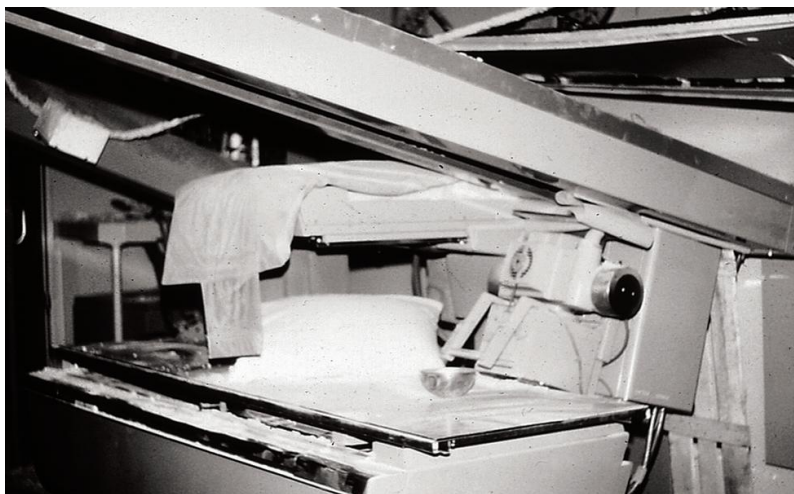


Figura 2.27 - Danno di macchina X-ray a seguito di evento sismico (FEMA, 2007).

2.2.3.3 Laboratori

I laboratori, data la presenza di notevoli quantità di materiali medicali, sono estremamente vulnerabili ad un evento sismico. Le sostanze contenute nei flaconi possono essere dannose per il contatto, per l'inalazione o per innesco di incendi.

A seguito di eventi sismici gli arredi come scaffali, cabine e credenze, sono soggetti a scivolamento e ribaltamento causando la rottura e l'inutilizzo di materiali medicali (Figura 2.28).



Figura 2.28 - Caduta a terra di medicinali posizionati su scaffalature (Linee guida Reluis, 2009).

2.4 OLIVE VIEW MEDICAL CENTER - CALIFORNIA

L'ospedale Olive View nella parte settentrionale della San Fernando Valley, nel sud della California, fu gravemente danneggiato a seguito del terremoto del 9 Febbraio 1971, tanto che la nuova struttura venne successivamente demolita. A seguito di tale evento più di 500 pazienti evacuarono l'ospedale.

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

Il campus dell'Olive View Hospital, da 850 posti letto, comprendeva oltre 30 edifici di differenti età, ma in particolare un complesso fu completato nel 1970, pochi mesi prima del terremoto. Questi nuovi edifici comprendevano il Medical Care Facility a cinque piani, l'unità psichiatrica di due, la centrale termica ed altri edifici secondari più piccoli utilizzati come magazzini. Gli edifici, tutti in cemento armato, erano costruiti secondo i codici antisismici dell'epoca.

Il terremoto di San Fernando del 1971 fu un evento estremo, tuttavia le prestazioni delle strutture risultarono peggiori di quanto previste. Indagini successive mostrarono come gli edifici erano conformi ai requisiti di codice, ma includevano caratteristiche che li rendevano particolarmente vulnerabili. A seguito di tale evento i codici antisismici furono aggiornati.



Figura 2.29 - Ribaltamento della torre scala (FEMA, 2007).

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

I danni che subirono gli edifici furono catastrofici. Tre delle quattro torri delle scale esterne subirono un ribaltamento (Figura 2.29). La tettoia delle ambulanze crollò sui mezzi di soccorso parcheggiati, distruggendoli.

Il primo piano del reparto psichiatrico crollò (Figura 2.2), fortunatamente in quel momento tutti gli occupanti si trovavano al secondo piano.

Subito dopo l'evento pazienti e personale medico iniziarono a riversarsi nel parcheggio adiacente la struttura, con ovvie difficoltà di censimento dei pazienti e dei trattamenti medici a loro riservati.

L'analisi successiva degli effetti di questo terremoto sull'ospedale ha rilevato carenze da un punto di vista strutturale ed organizzativo, come la mancanza di una rete di comunicazione intera ed esterna, l'assenza di un piano di evacuazione efficace e di qualsiasi controllo o tracciamento delle cure mediche.

A distanza di quasi 15 anni dall'evento di San Ferdinando del 1971 fu aperto il nuovo ospedale realizzato nello stesso sito. L'edificio fu costruito molto più resistente rispetto a quanto previsto dai codici normativi, presentava un sistema di pareti in cemento armato per assorbire le azioni sismiche e fu dotato di un sistema per registrare la risposta ad eventi futuri.

La mattina del 17 Febbraio 1994 ebbe luogo un terremoto di magnitudo M_w 6.7 vicino a Nothridge, a circa 10 km dall'ospedale. La strumentazione di cui era stato dotato l'ospedale registrò un'accelerazione di 0.82 g al primo piano e 1.7 g in copertura. La

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti
struttura subì pochi danni o quasi nulli, ma la sua elevata rigidezza e resistenza contribuirono al trasferimento dell'accelerazione ai componenti presenti all'interno della struttura, danneggiandone le connessioni alla struttura. Alcuni di questi componenti non furono considerati sufficientemente vulnerabili in fase di progetto da richiedere rinforzi speciali.



Figura 2.30 - Danneggiamento alle connessioni di serbatoi in copertura (FEMA, 2007).

I danni riscontrati furono i seguenti:

- slittamento, ed in alcuni casi danneggiamento, di ancoraggi per attrezzature, come i serbatoi, poste al livello della copertura (Figura 2.30), dove si sono registrate accelerazioni significative. Inoltre, questi spostamenti hanno causato la rottura delle tubazioni dell'acqua dell'impianto di

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

condizionamento, provocando l'inondazione dei piani inferiori;

- eccessivi scuotimenti hanno causato il ribaltamento di televisori montati alle pareti;
- danni estesi a controsoffitti inaspriti dalle perdite alle tubazioni soprastanti;
- eccessiva oscillazione ed interazione tra controsoffitti e linee dell'impianto antincendio, causando ulteriori perdite;
- danneggiamento di generatori e serbatoi per lo stoccaggio di carburante (Figura 2.31);
- ascensori non funzionanti a seguito di deragliamento e danneggiamento dei contrappesi.



Figura 2.31 - Ribaltamento di serbatoi per lo stoccaggio di carburante (FEMA, 2007).

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

Subito dopo l'evento, il personale preposto all'emergenza ha pianificato un'evacuazione parziale di 79 pazienti, per poi estenderla a tutti i 377 pazienti, a causa dei danni alle tubazioni dell'acqua.

Nonostante le prestazioni strutturali notevolmente migliorate rispetto al terremoto di San Ferdinando del 1971, le funzioni dell'ospedale sono state notevolmente compromesse a seguito di danni a componenti non strutturali, rendendolo non adeguato ad accogliere vittime del terremoto. La scarsa prestazione di tali componenti da un lato è dipesa dall'eccezionalità dell'evento sismico e dall'altro da un sistema strutturale molto rigido che non ha dissipato l'energia del sisma.

Questo caso emblematico sottolinea come, anche quando la componente strutturale non subisce danni, l'interruzione può avvenire per danni ad elementi non strutturali ed impiantistici.

2.5 OSPEDALE SAN SALVATORE - L'AQUILA

L'Ospedale "San Salvatore", situato nel Comune di Coppito in Provincia di L'Aquila, ha una capacità di 500 posti letto e comprende 14 edifici giuntati tra loro e ciascuno composto da più unità indipendenti. Le singole unità strutturali sono costituite da telai in cemento armato di tre o cinque piani. Sebbene l'ospedale sia stato ufficialmente inaugurato nel 2000, il progetto originale fu completato nel 1967. Come tale, la struttura fu progettata considerando una distribuzione di forze statiche equivalenti, applicate a ciascun impalcato, pari al 7% del suo peso sismico.



Figura 2.32 - Danneggiamento colonna al piano terra.

Il 9 Aprile 2017 un terremoto di magnitudo Mw 6.3 ha interessato il centro Italia. L'epicentro dell'evento è stato localizzato a circa 4 km a sud dell'Ospedale "San Salvatore". La più vicina stazione accelerometrica situata a 2 km di distanza ha registrato un'accelerazione al suolo di 0.5 g. L'evento sismico si è verificato durante le ore notturne e non sono stati registrati incidenti mortali agli occupanti. Subito dopo l'evento, a causa dell'interruzione di elettricità, sono stati attivati i generatori di emergenza che hanno sopperito a tale

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti
mancanza per diverse ore, garantendo anche il funzionamento di alcune sale operatorie. Il mattino seguente un sopralluogo della struttura ha manifestato danni strutturali significativi interessando principalmente tre edifici. Ciononostante, tutti gli edifici del campus sono stati chiusi in maniera precauzionale ed è stato allestito un ospedale da campo.



Figura 2.33 - Rottura a taglio di una colonna tozza.

Considerando l'entità dell'evento sismico, i criteri di progettazione adottati ed il danneggiamento limitato a colonne di 3 edifici, si può affermare che nel complesso, la struttura ha reagito in modo adeguato. Come riportato, diverse colonne al piano terra dell'ingresso principale

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

e del pronto soccorso hanno subito danneggiamenti (Figura 2.32), che possono essere riconducibili ad un meccanismo di piano soffice in quanto gli elementi di tamponamento erano presenti solamente ai piani superiori.

Una serie di colonne al piano terra in un secondo edificio hanno manifestato una tipica rottura a taglio che interessa gli elementi tozzi (Figura 2.33). Altre tipologie di danni sono derivanti da carenza di dettagli soprattutto in corrispondenza dei giunti sismici, specialmente per quanto riguarda i pannelli di tamponamento. Le dimensioni del giunto tra il rivestimento esterno in mattoni è risultato essere minore rispetto a quello tra elementi strutturali in cemento armato e ciò ha portato al danneggiamento locale dei pannelli murari.

I danni principali alle tamponature si sono verificati ai piani superiori dell'ingresso del pronto soccorso, manifestando il completo ribaltamento della tamponatura esterna e la successiva ostruzione degli accessi principali ai locali preposti all'emergenza.

Tra i danni a componenti non strutturali sono stati riscontrati disallineamenti e cadute di controsoffitti. Alcune delle lampade di alcuni corridoi hanno riportato un disallineamento.

Le attrezzature mediche, anche se non erano adeguatamente protette su scaffali e carrelli, non hanno riportato danni eccessivi; solamente alcuni monitor posizionati in quota sono rovinati a terra. Gli ancoraggi delle principali apparecchiature mediche hanno lavorato adeguatamente garantendone l'operatività, ma alcune classi di apparecchiature come risonanza magnetica e macchinari per

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti
radioterapia, hanno subito danni interni richiedendo una calibrazione
prima del riutilizzo.



(a)



(b)

Figura 2.34 - Ingresso pronto soccorso Ospedale San Salvatore: situazione pre evento (a); ribaltamento della tamponatura del secondo livello (b).

Per quanto riguarda la fornitura di servizi di pubblica utilità, l'ospedale ha ben sopperito ad interruzioni di fornitura di elettricità con i generatori di emergenza. Anche la restante parte impiantistica ha ben lavorato a seguito dell'evento. Ciò è dipeso dall'ispezione nel 2002 da parte del Dipartimento di Protezione Civile e dall'Applied Technology Council (ATC) di Redwood City (California) che ha previsto l'adeguamento degli impianti.

2.6 CLASSIFICAZIONE COMPONENTI NON STRUTTURALI

Dalla rassegna degli stati di danneggiamento intercorsi a differenti componenti non strutturali a seguito di eventi sismici passati, è emerso come questi siano vulnerabili alle eccessive deformazioni della struttura, scivolamento o ribaltamento. È, quindi, possibile classificare i componenti non strutturali in due categorie:

- la prima include elementi sensibili alle deformazioni, tipicamente misurate valutando lo spostamento relativo tra due impalcati successivi, denominato intersory-drift. Esempi di componenti rientranti in tale categoria sono i muri di ripartizione, le murature perimetrali, pareti vetrate, controsoffitti connessi rigidamente e tubazioni che attraversano differenti impalcati. Questi ultimi sono spesso

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

connessi rigidamente alla struttura e si estendono da un piano all'altro della struttura;

- la seconda categoria considera gli elementi sensibili alle accelerazioni come ad esempio i macchinari ancorati agli impalcati della struttura. Questi sono vulnerabili allo scivolamento o ribaltamento se gli ancoraggi sono inadeguati.

Tuttavia, molti dei componenti manifestano sia vulnerabilità alle deformazioni che alle accelerazioni. Di questi è possibile definirne una vulnerabilità primaria ed una secondaria. In Tabella 2.1 sono riassunti i principali componenti non strutturali e le relative sensibilità a deformazioni ed accelerazioni.

| Componente | Sensibilità | |
|--|---------------|--------------|
| | Accelerazioni | Deformazioni |
| Componenti architettonici | | |
| Pareti perimetrali di tamponamento | Secondaria | Primaria |
| Pareti di ripartizione interna | Secondaria | Primaria |
| Pareti vetrate | Secondaria | Primaria |
| Rivestimenti esterni ancorati e non ancorati | Secondaria | Primaria |
| Rivestimenti esterni prefabbricati | Secondaria | Primaria |
| Porte | Secondaria | Primaria |
| Controsoffitti ancorati al soffitto | Primaria | |
| Controsoffitti sospesi | Secondaria | Primaria |
| Parapetti e appendici | Primaria | |
| Tettoie | Primaria | |
| Ciminiere | Primaria | |
| Scale | Primaria | Secondaria |
| Apparecchiature meccaniche e impianti | | |
| Boilers | Primaria | |
| Impianti di condizionamento con e | Primaria | |

Capitolo 2 - Risposta sismica delle strutture ospedaliere esistenti

| senza isolamento per le vibrazioni | | |
|------------------------------------|------------|------------|
| Serbatoi | Primaria | |
| Tubazioni in pressione | Primaria | Secondaria |
| Tubazioni impianto antincendio | Primaria | Secondaria |
| Condotti | Primaria | Secondaria |
| Tubazioni del gas | Primaria | Secondaria |
| Motori ascensori | Primaria | |
| Guide e contrappesi ascensori | Secondaria | Primaria |
| Apparecchiature medicali e arredi | | |
| Distributori medicinali | Primaria | |
| Scaffali e armadi | Primaria | |
| Macchina raggi X, TAC | Primaria | |
| Lampade scialitiche | Primaria | |

Tabella 2.1 - Classificazione dei componenti in funzione della loro sensibilità.

Ciò che, inoltre, influenza la vulnerabilità dei componenti non strutturali è il loro collocamento all'interno dell'edificio. Se i componenti sono collocati al piano terra, immediatamente al di sopra delle fondazioni, rispondono allo scuotimento in maniera simile agli edifici. Ciò che regola la loro risposta sono le proprie caratteristiche dinamiche (massa e rigidità) e l'input sismico (contenuto in frequenza, durata ecc.). Mentre, il comportamento dinamico di componenti posizionati ai piani superiori dipende dall'interazione tra le caratteristiche dinamiche della struttura ed il componente.

CAPITOLO 3

IL PARADIGMA DELLA 'SMART HEALTH FACILITY'

La sicurezza di edifici strategici come le strutture ospedaliere è solo parzialmente legata alla performance degli elementi strutturali principali. Rigidezza e duttilità sono parametri progettuali rilevanti, ma il loro impatto è limitato alla sicurezza della vita degli occupanti. Le moderne normative antisismiche definiscono severi requisiti per i componenti strutturali e non strutturali. Esse mirano ad assicurare che il sistema rimanga in condizioni operative nel caso di terremoti frequenti. Le apparecchiature elettro-meccaniche e mediche, i serbatoi ed i sistemi di distribuzione, di riscaldamento, di ventilazione e condizionamento, ascensori e sistemi di alimentazione hanno un ruolo predominante nella gerarchia della sicurezza nei confronti delle prestazioni degli elementi strutturali.

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

La valutazione della sicurezza degli ospedali esistenti è di gran lunga più complessa rispetto alla progettazione ex-novo. Sono quindi necessari approcci standardizzati, criteri e indicatori per una valutazione ed una gestione affidabile.

La protezione sismica di complessi ospedalieri, sfruttando i recenti progressi nel campo dello sviluppo di strutture e sistemi intelligenti, è in grado di trarre vantaggio dalle informazioni sul loro stato di salute prodotte in maniera automatizzata. Lo sviluppo delle cosiddette SHFs si basa, dunque, sull'attuazione di strategie di monitoraggio consistenti nell'installazione di una serie di sensori e procedure di trattamento automatizzato dei dati, in grado di estrarre informazioni rilevanti riguardo le condizioni e le prestazioni del sistema monitorato, partendo dai dati grezzi raccolti dai sensori.

Una struttura ospedaliera "intelligente", in grado di effettuare un'autodiagnosi, rappresenta anche uno strumento primario per la riduzione della vulnerabilità amministrativa e organizzativa, agendo sul grado di preparazione del personale in caso di un terremoto e supportando la gestione e manutenzione degli elementi strutturali e non strutturali nel tempo. In questo quadro, la combinazione di programmi di monitoraggio con le strategie di allerta precoce fornisce un ulteriore livello di protezione sismica (spegnimento di apparecchiature critiche, riduzione del rischio di perdite indirette legate al collasso di serbatoi e sistemi di distribuzioni) a fronte di costi ridotti. Il monitoraggio continuo dello stato di salute e delle prestazioni degli ospedali, comprese le attrezzature e gli impianti, può

fornire, dunque, un valido supporto anche alla formulazione del piano di mitigazione dei disastri e nella definizione delle priorità di investimenti per la sicurezza delle persone e delle merci. Lo sviluppo di un sistema intelligente, che analizza i dati relativi ai diversi sottosistemi (struttura, attrezzature, impianti e così via) e fornisce informazioni sintetiche sulle sue prestazioni generali, nonchè, eventuali avvertimenti in caso di danni o difetti, può in maniera efficace ed efficiente portare in conto la natura critica e l'interdipendenza dei vari processi, edifici e attrezzature, nella valutazione delle condizioni di sicurezza e nella gestione di infrastrutture complesse come gli ospedali.

3.1 SISTEMI DI MONITORAGGIO DI STRUTTURE OSPEDALIERE

Prima di definire una strategia di monitoraggio si procede alla descrizione di sistemi di monitoraggio installati in complessi ospedalieri.

Attualmente, sono diverse le strutture ospedaliere monitorate in tutto il mondo. La US Geological Survey, con il National Strong Motion Project (NSMP; <http://nsmg.wr.usgs.gov/>) e in collaborazione con il Department of Veterans Affairs (VA), ha installato sistemi di monitoraggio sismico su 28 ospedali nelle regioni sismicamente attive degli Stati Uniti, Alaska, e Puerto Rico, acquisendo dati sulla loro risposta alle vibrazioni indotte dal sisma. In Figura 3.1 sono

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

individuati tutti gli ospedali monitorati osservando come questi sono concentrati in aree ad elevato rischio sismico. Una lista dei 28 ospedali monitorati è riportata in Tabella 3.1.



Figura 3.1 - Mappa con indicazione dei sistemi di monitoraggio installati sugli edifici del Veterans Affairs' Hospital negli Stati Uniti (<http://nsmp.wr.usgs.gov/>).

I sistemi di controllo installati negli USA sono basati su accelerometri e elaborazioni in tempo reale per valutare la salute strutturale di ogni ospedale dopo un evento sismico. L'architettura tipica dei sistemi di controllo è illustrata in Figura 3.2.

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

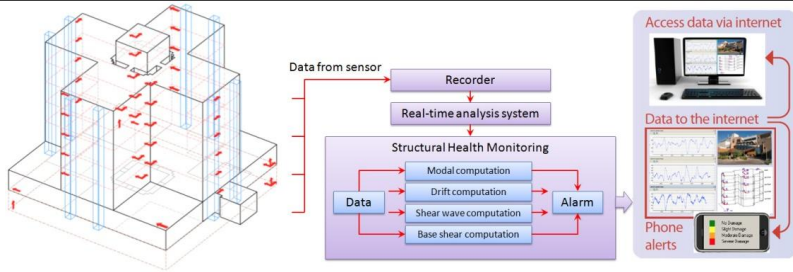


Figura 3.2 - Architettura di un sistema di monitoraggio per i servizi sanitari negli U.S.A. - adattato da (Ulusoy et al., 2013).

| Stato | Località | Nome Edificio | Numero piani | | Numero Sensori | |
|-------|------------------|--------------------------|--------------|-------|----------------|-------|
| | | | Interrato | Fuori | Struttura | Suolo |
| AK | Anchorage | New Hospital Building | - | 2 | 21 | 3 |
| CA | Palo Alto | Outpatient Clinic | 1 | 4 | 24 | 3 |
| CA | Palo Alto | Outpatient Clinic | 1 | 4 | 12 | |
| CA | Menlo Park | Center Core Building | 1 | 3 | 24 | 3 |
| CA | Livermore | MS and N | 1 | 6 | 24 | 3 |
| CA | San Francisco | AmbCare/Clinical Support | 1 | 4 | 16 | 3 |
| CA | Los Angeles | Out Patient Clinic | 1 | 6 | 24 | 3 |
| CA | Sepulveda | Outpatient Clinical Care | | 3 | 24 | 3 |
| CA | West Los Angeles | Research Lab | 1 | 4 | 12 | 3 |
| CA | West Los Angeles | Main Hospital | 1 | 7 | 24 | 3 |
| CA | San Diego | Main Hospital | 1 | 6 | 60 | 3 |
| IL | Marion | Main Hospital | 1 | 4 | 48 | 3 |
| MO | Poplar Bluff | Medical / Nursing / PCC | - | 7 | 48 | 3 |
| MT | Fort Harrison | Main Hospital | - | 6 | 24 | 3 |
| NV | Reno | New Bed Building/Clinic | - | 6 | 36 | 3 |
| PR | San Juan | Nursing Building | - | 2 | 12 | 3 |
| PR | San Juan | New Bed Tower | 1 | 6 | 24 | 3 |

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

| Stato | Località | Nome Edificio | Numero piani | | Numero Sensori | |
|-------|----------------|-----------------------|--------------|-------|----------------|-------|
| | | | Interrato | Fuori | Struttura | Suolo |
| OK | Oklahoma City | Main Hospital | 1 | 11 | 60 | 3 |
| OR | Roseburg | Main Hospital | - | 5 | 36 | 3 |
| OR | White City | Primary Care Clinic | - | 2 | 12 | - |
| OR | Portland | Main Hospital | 2 | 9 | 39 | - |
| SC | Charleston | Main Hospital | - | 5 | 48 | 3 |
| TN | Memphis | Spinal Chord Injury | - | 3 | 12 | 3 |
| TN | Memphis | Bed Tower | - | 3 | 24 | |
| UT | Salt Lake City | Main Hospital | 1 | 4 | 24 | 3 |
| VA | Richmond | Main Hospital | 1 | 5 | 36 | 3 |
| WA | Seattle | Main Hosp. Diag. | 1 | 7 | 27 | 3 |
| WA | Vancouver | Barnes Rehab Building | - | 3 | 24 | 3 |

Tabella 3.1 - Elenco degli ospedali V.A. caratterizzati dall'installazione di un sistema di monitoraggio avanzato della risposta dinamica in presenza di azioni sismiche.

Questi sistemi provvedono all'acquisizione del segnale proveniente dai differenti sensori a seguito di un evento sismico e si basano sul calcolo dell'interstory drift, sul comportamento dinamico della costruzione e sulla propagazione delle onde sismiche.

In Italia, invece, nell'ambito della rete nazionale dell'Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS), il Dipartimento della Protezione Civile (<http://www.protezionecivile.gov.it>) negli ultimi dieci anni ha monitorato le vibrazioni prodotte dai terremoti in 149 edifici pubblici (45% scuole, 21% municipi, 17% ospedali, 17% altre tipologie), 7 ponti e 1 diga. Questi edifici pubblici si trovano in comuni classificati per lo più in zona 1 (43%) e 2 (51%). Diversi sono gli esempi di monitoraggio

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

dei complessi ospedalieri. Tali sistemi prevedono, nella maggior parte dei casi, l'installazione di accelerometri e trasduttori di spostamento sulla sola componente strutturale.

Una sintesi schematica delle strutture ospedaliere oggetto di monitoraggio strutturale nell'ambito dell'OSS è riportata in Tabella 3.2. Tra le strutture elencate, due sono state selezionate ed analizzate nel dettaglio. La prima si tratta di una struttura ospedaliera situata negli Stati Uniti, la seconda è situata in Italia.

| STRUTTURA OSPEDALIERA | | | | SENSORI | |
|-----------------------|------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|------------|---|
| # | Nome | Comune | Tipologia strutturale | n. sensori | Tipologia dei sensori |
| 1 | Ospedale regionale S. Croce | Castel Nuovo in Garfagnana (LU) | telaio c.a. | 16 | Accelerometri triassiali e monoassiali |
| | | | | 1 | Trasduttore di spostamento |
| 2 | Ospedale Garibaldi | Catania (CT) | telaio c.a. | 12 | Accelerometri Strong-motion, force-balance mono/bi/triassiali |
| | | | | 1 | Trasduttore di spostamento |
| 3 | Ospedale Ascoli Tomasselli | Catania (CT) | telaio c.a. | 18 | Strong-motion, force-balance mono/bi/triassiali |
| | | | | 1 | Trasduttore di spostamento |
| 4 | Ospedale S. Giovanni di Dio | Crotone (KR) | telaio c.a. | 20 | Accelerometri Strong-motion, force-balance mono/bi/triassiali |
| 5 | Ospedale Civile "S. Antonio Abate" | Fivizzano (MS) | telaio c.a. | 18 | Accelerometri Strong-motion, force-balance mono/bi/triassiali |
| | | | | 1 | Trasduttore di spostamento |
| 6 | Ospedale | Isernia (IS) | telaio c.a. | 13 | Accelerometri Strong-motion, force-balance mono/bi/triassiali |
| | | | | 2 | Trasduttore di spostamento |

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

| STRUTTURA OSPEDALIERA | | | | | SENSORI |
|-----------------------|--|------------------------|-----------------------|------------|---|
| # | Nome | Comune | Tipologia strutturale | n. sensori | Tipologia dei sensori |
| 7 | Ospedale San Giovanni di Dio | Melfi (PZ) | telaio c.a. | 9 | Accelerometri Strong-motion, force-balance mono/bi/triassiali |
| 8 | Ospedale Civico - Padiglione uffici e servizi | Palermo (PA) | telaio c.a. | 11 | Accelerometri Strong-motion, force-balance mono/bi/triassiali |
| | | | | 3 | Trasduttore di spostamento LVDT |
| 9 | Presidio Ospedaliero - Distretto sanitario n°3 | Piedimonte Matese (CE) | telaio c.a. | 16 | Accelerometri Strong-motion, force-balance mono/bi/triassiali |
| 10 | Ospedale Riuniti | Reggio Calabria (RC) | telaio c.a. | 10 | Accelerometri Strong-motion, force-balance mono/bi/triassiali |
| | | | | 1 | Trasduttore di spostamento |
| 11 | Ospedale - padiglione Giannoni | Sanremo (IM) | telaio c.a. | 13 | Accelerometri Strong-motion, force-balance mono/bi/triassiali |
| 12 | Poliambulatorio NEFETTI | Santa Sofia (FC) | telaio c.a. | 17 | Accelerometri Strong-motion, force-balance mono/bi/triassiali |
| | | | | 3 | Trasduttore di spostamento |
| 13 | Ospedale dell'Annunziata | Sulmona (AQ) | telaio c.a. | 11 | Accelerometri Strong-motion, force-balance mono/bi/triassiali |
| | | | | 1 | Trasduttore di spostamento |
| 14 | Poliambulatorio | Turianova (RC) | telaio c.a. | 12 | Accelerometri Strong-motion, force-balance mono/bi/triassiali |

Tabella 3.2 - Sistemi di monitoraggio installati in complessi ospedalieri italiani.

3.1.1 Veterans Affairs Medical Center, San Diego - California

L'edificio in questione è il principale ospedale di San Diego V.A. Healthcare System (<http://www.sandiego.va.gov>). La costruzione,

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

avente un'altezza di 38 m e controventata con dei telai in acciaio, è stata costruita nel 1972 e dispone di sei piani fuori terra e un piano seminterrato. La sua superficie totale è di circa 79422 m², con una superficie di piano di circa 9848 m² (Figura 3.3) (Kalkan et al., 2012).



Figura 3.3 – Edificio No.1 San Diego Veterans Affairs Medical Center, California (vista frontale) (Kalkan et al., 2012).

La pianta dell'edificio è composta da quattro ali e un nucleo centrale. Ogni ala sporgente dal nucleo centrale è larga 48 m e lunga 45 m, come mostrato in Figura 3.3. Il primo piano è a pianta quadrata e si estende interamente per 137 m all'estremità delle ali, questo si traduce in un'irregolarità verticale dovuta ad un'importante riduzione di superficie dei piani superiori. Il terreno in pendenza determina la presenza di un piano seminterrato sotto le tre ali settentrionali.

La rigidità laterale dell'edificio è fornita principalmente da otto torri sismiche situate intorno all'edificio e fissate rigidamente a ciascun piano fuori terra.

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

Un totale di 60 accelerometri (Figura 3.4) sono posti sugli otto livelli dell'edificio per misurarne la risposta al moto del suolo. Un accelerometro triassiale e due accelerometri orientati verticalmente sono collocati in un angolo del seminterrato per misurare l'ingresso del moto del suolo. Un accelerometro triassiale e tre accelerometri sono collocati al piano terra e al primo piano. Gli accelerometri sono posizionati agli estremi del piano e centralmente per misurare la risposta delle ali e del nucleo dell'edificio.

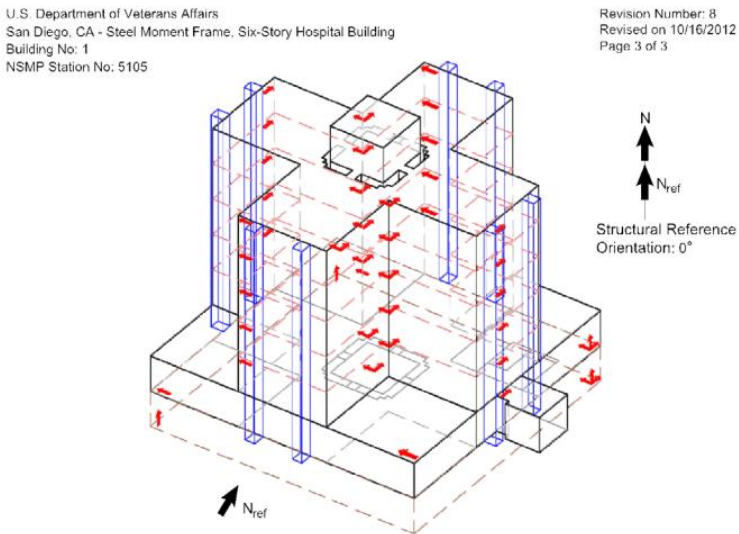


Figura 3.4 - Layout dei 60 sensori nell'edificio 1 della San Diego V.A. Medical Center, California (Kalkan et al., 2012).

Due accelerometri triassiali sono montati sul nucleo a livello del soffitto del sesto piano; questi sensori orientati verticalmente,

forniranno misurazioni del moto oscillatorio della sovrastruttura, nonché la flessione del nucleo. Ulteriori sensori sismici sono installati lontano dall'edificio monitorato, situati su un sito di riferimento, per registrare le vibrazioni in condizioni di campo-libero. La strumentazione installata è sufficientemente sensibile per registrare la risposta al sisma dell'edificio in caso di piccoli terremoti locali. I sistemi di monitoraggio sono progettati per fornire informazioni sullo stato di salute della struttura, basato sul calcolo dell'interstory drift, sul comportamento flessionale e torsionale della costruzione ed il tempo di propagazione delle onde sismiche dalla fondazione alla copertura (Kalkan et al., 2012).

3.1.2 Palazzina Hospice "Nesima" - Catania

Il corpo A Palazzina Hospice "Nesima" (Figura 3.5a) sito nel territorio comunale di Catania è una costruzione risalente al 2005, realizzata con una struttura di cemento armato ordinario. Presenta tre piani fuori terra (Figura 3.5b) e un piano seminterrato. La struttura portante è costituita da un telaio spaziale in cemento armato che si sviluppa nell'ambito dei quattro livelli.

Nella porzione più a nord dell'edificio è presente un corpo scala che collega tutti i livelli della struttura. La distribuzione delle masse di piano in pianta, risulta abbastanza simmetrica rispetto alle due direzioni principali.

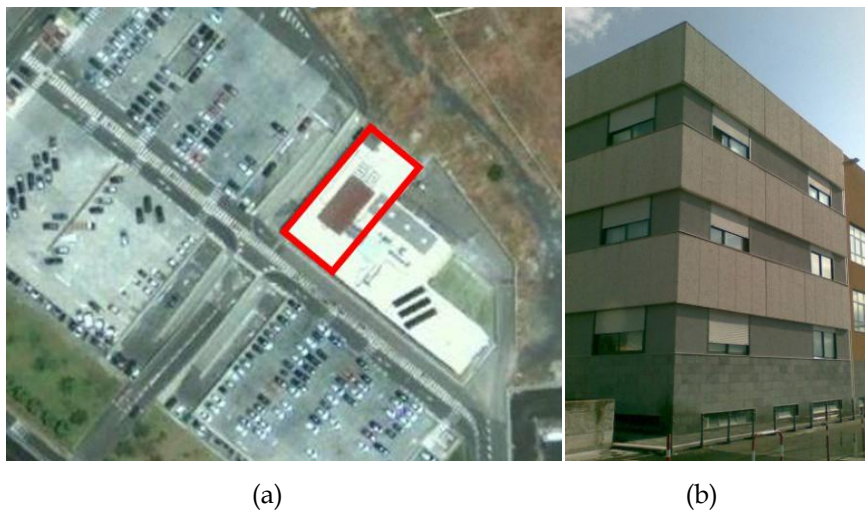
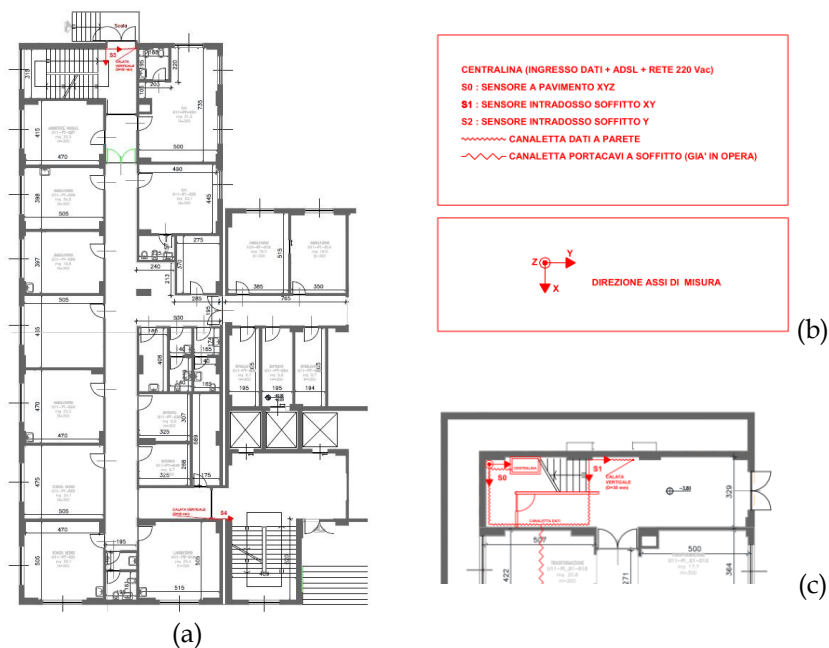


Figura 3.5 – Hospice, Edificio corpo A: aerea dell'edificio corpo A (a); vista lato nord - ovest (b) (<http://www.protezionecivile.gov.it>).

Il sistema di monitoraggio installato risulta essenzialmente composto di tre componenti principali:

- la centralina di monitoraggio automatica GeoSIG CR-4 a 16 bit è composta da un'unità di acquisizione dati, un'unità di registrazione dati, un'unità di sincronizzazione temporale, un'unità di comunicazione remota ed un'unità di gestione del sistema. Il sistema di monitoraggio prevede un sistema di sincronizzazione del tempo realizzato mediante antenna GPS del tipo GARMIN 35 LP, posizionata a piano terra;
- i sensori accelerometrici del tipo GeoSIG AC 61/62/63 Strong-motion servoaccelerometri, di tipo force-balance,

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'
 monoassiali, biassiali e triassiali. Con un fondo scala compreso tra $\pm 2G$ standard, ($\pm 1G$ sensore free-field) ed un range di frequenza 0 - 100 Hz.



**Figura 3.6 - Hospice, edificio corpo A : Pianta Piano 1 Seminterrato(a);
 legenda (b); layout sensori e centralina (c)
 (<http://www.protezionecivile.gov.it>).**

La rete di monitoraggio è composta da cavi di segnale di tipo Belden 9505 a 6 coppie singolarmente intrecciate, con schermatura ed isolamento globale, sezione conduttore pari a 0.25 mm^2 , canalizzazioni di protezione e scatole di protezione e derivazione. È presente inoltre un sensore near-field all'interno dell'edificio nel vano centralina, in

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

corrispondenza di un plinto di fondazione di uno dei pilastri perimetrali dell'edificio.

La strumentazione del giunto strutturale vede l'installazione di un fessurimetro di tipo induttivo GeoSIG-LVDT25, reso solidale ai manufatti mediante tasselli a espansione. In Tabella 3.3 si riportano tipo e sigle identificative di ciascun sensore, con gli orientamenti dei relativi assi di misura. In Figura 22 è descritta schematicamente l'ubicazione dei sensori e relativi assi di misura.

| Sito | Posizione | Rif. | Scala | Tipo | Montaggio |
|----------------------------|----------------------|---------|--------|------|-----------|
| | | Sensore | | | |
| Nuovo Garibaldi Hospice | Near-filed - Piano - | S0 | ±1g | XYZ | Pavimento |
| | Piano -1 | S1 | ±2g | XY | Pilastro |
| | Piano -1 | S2 | ±2g | Y | Trave |
| | Piano terra | S3 | -2g | XY | Pilastro |
| | Piano terra | S4 | -2g | Y | Trave |
| | Piano primo | S5 | -2g | XY | Pilastro |
| | Piano primo | S6 | ±2g | Y | Pilastro |
| | Piano secondo | S7 | ±2g | XY-Z | Pilastro |
| | Piano secondo | S8 | ±2g | Y-Z | Trave |
| | Piano secondo | L1 | +25 mm | LVDT | Trave |

Tabella 3.3 - Ubicazione e descrizione dei sensori
(<http://www.protezionecivile.gov.it>).

3.1.3 Osservazioni sui sistemi di monitoraggio installati in complessi ospedalieri

Dall'analisi delle strutture indagate è emerso come entrambi i sistemi di monitoraggio sono caratterizzati dall'installazione di sensori accelerometrici e sensori di spostamento per monitorare gli spostamenti tra edifici contigui giuntati.

Entrambi i sistemi analizzati non prevedono l'acquisizione e l'elaborazione in continuo dei dati (h 24), ma solamente la registrazione delle serie temporali che superano una soglia di trigger prefissata, quindi, solamente a seguito di un evento sismico. Sulla base di tali registrazioni vengono effettuate analisi per la valutazione dello stato di salute della componente strutturale. I sistemi di monitoraggio americani basano le loro valutazioni di stati di danneggiamento sul calcolo dell'interstory drift, la propagazione delle onde ed il calcolo del taglio alla base. Mentre, i sistemi di monitoraggio italiani eseguono l'analisi delle serie temporali e confrontano i parametri dinamici della struttura basandosi anche sull'utilizzo di modelli agli elementi finiti della struttura.

Un sistema di monitoraggio che prevede solamente l'utilizzo di accelerometri e trasduttori di spostamento e l'acquisizione dei dati solamente a seguito di un evento sismico, non è in grado di fornire informazioni sull'operatività della struttura ospedaliera, se non in via indiretta.

Inoltre, si rileva come non sono presenti sistemi di monitoraggio della componente non strutturale e impiantistica, che risultano indispensabile in vista della definizione dello stato di salute dell'intera infrastruttura sia a seguito di un evento sismico che durante il corso della propria vita.

3.2 SMART HEALTH FACILITY

Un'efficace "Smart Health Facility" (SHF) richiede l'installazione di un numero adeguato di sensori, diversi per tipologia e prestazioni, e, soprattutto, di un efficiente sistema di elaborazione dati. Quest'ultimo acquisisce i dati in uscita dal sensore, li elabora ed, infine, fornisce un allarme. Elaborazione, compressione ed immagazzinamento dati, frequenza di campionamento e campionamento simultaneo sono i problemi nodali, in particolare in presenza di un gran numero di sensori installati.



Figura 3.7 - Sensori ed integrazione dati in una SHF.

I dati provenienti da differenti tipologie di sensori installati su diversificati componenti strutturali, non strutturali, macchinari ed impianti devono essere raccolti in tempo reale in un database relazionale (Figura 3.7). Per una risposta quasi in tempo reale del

sistema, i dati devono essere raccolti, memorizzati, validati e processati in brevissimo tempo. La frequenza di campionamento deve essere scelta con cura al fine di acquisire e gestire una quantità di dati ottimale. Il problema del campionamento simultaneo è facilmente risolvibile quando viene utilizzato un unico data logger, in quanto la sincronizzazione dei dati è disciplinata dal data logger stesso. Se si utilizzano due o più data logger, è necessario adottare opportune strategie al fine di garantire un campionamento simultaneo.

I sensori devono essere in grado di misurare la risposta del sistema sia in condizioni operative che nel caso di un evento sismico. Il tipo di sensore dipende dalle esigenze del monitoraggio.

Le informazioni provenienti dai sensori possono essere utilizzate anche per l'attuazione delle strategie di controllo in grado di migliorare la sicurezza complessiva in caso di un terremoto. È il caso, ad esempio, degli ascensori: le informazioni provenienti da accelerometri distribuiti sulla struttura ed eventualmente da sistemi di Early Warning (EW), possono essere utilizzate per attivare strategie per l'arresto immediato di ascensori in caso di un terremoto potenzialmente dannoso.

Una scelta appropriata dei sensori e le considerazioni delle principali questioni relative all'installazione ed elaborazione dati (manutenzione dei sensori, volume dei dati e il tempo di elaborazione) rappresentano questioni fondamentali per l'implementazione di efficaci SHFs. La protezione di sensori, cavi e collegamenti è fondamentale per garantire

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

la durabilità del sistema e la qualità dei dati. Per alcuni tipi di sensori bisogna considerare gli effetti indotti da radiazioni elettromagnetiche.

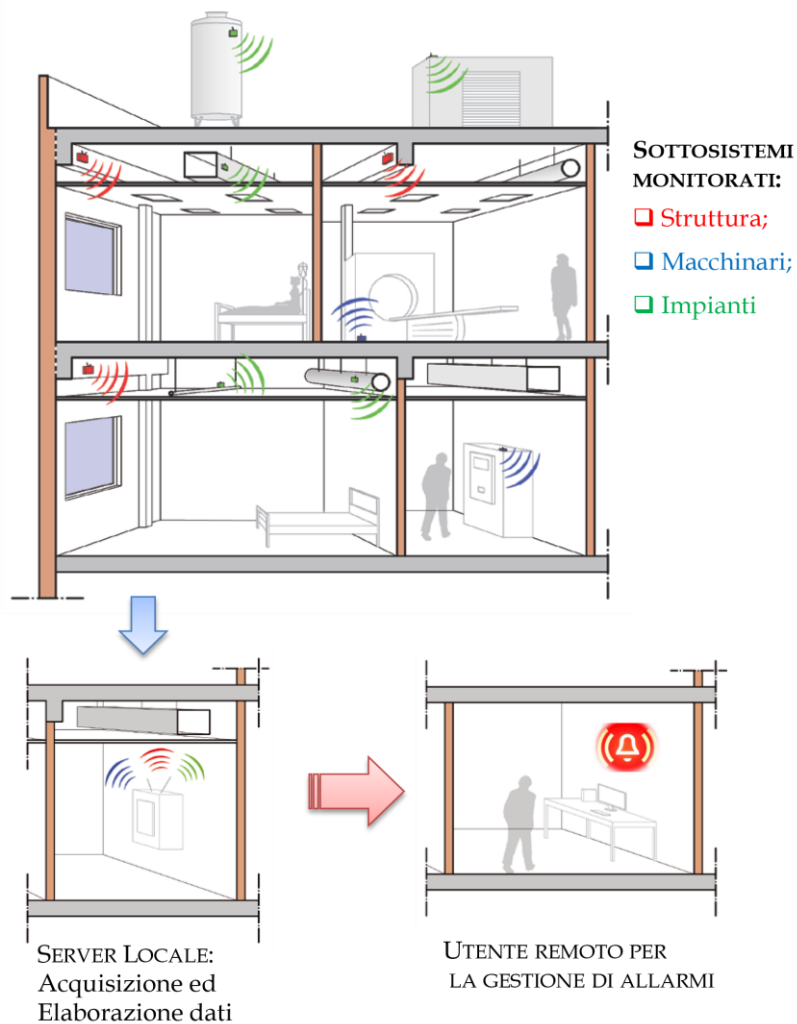


Figura 3.8 - Architettura di un sistema di monitoraggio integrato per SHF.

Una tipica architettura è basata su sensori remoti cablati direttamente ad un sistema centralizzato di acquisizione dati, come rappresentato nella Figura 3.8. Il ruolo del server centrale è quello di aggregare, memorizzare ed elaborare i dati. Tuttavia, poiché il numero di sensori aumenta, è preferibile adottare architetture modulari o, quando possibile, unità di rilevamento wireless, al fine di minimizzare l'impatto del sistema di controllo con le funzioni dell'ospedale.

Per ciascun componente da monitorare è necessario sviluppare strategie di monitoraggio specifiche con lo scopo di identificare stati di danneggiamento. Ad esempio, algoritmi basati sui parametri modali (Doebling et al., 1996) sono adatti per una valutazione globale della struttura. Altri approcci sono basati sul post-processing dei dati di misura per rilevare anomalie direttamente dalle misurazioni (modelli ARMA, analisi wavelet e così via). In entrambi i casi, la tendenza è quella di utilizzare metodi che sono in grado di automatizzare il processo di identificazione del danno sfruttando i recenti progressi nel campo delle tecnologie dell'informazione (Aktan et al., 2005). Oltre ai metodi basati sulle vibrazioni, è possibile utilizzare anche misure statiche per la valutazione del danno (Lanata, 2008).

Una piattaforma integrata per la protezione sismica delle strutture ospedaliere dovrebbe anche tener conto delle seguenti misure:

- prevenzione durante gli anni prima di un terremoto, attraverso la progettazione sismica, il rafforzamento degli edifici, e l'installazione di sistemi di allarme rapido di

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

terremoto, allarmi sismici e sistemi di risposta rapida al terremoto;

- Early Warning (EW), rappresentato dalle misure che possono essere effettuate ogni volta che un evento sismico rilevante viene registrato da una rete sismica, come l'evacuazione degli edifici o l'arresto dei sistemi critici. Il sistema di early warning deve essere in grado di calcolare in tempo reale i parametri sismici. Ogni volta che una certa soglia viene superata, un segnale di avviso deve essere trasmesso ai ricevitori interessati per innescare adeguate contromisure;
- gestione delle emergenze, rappresenta tutte le azioni da intraprendere nelle prime ore dopo l'evento oppure ogniqualvolta le condizioni strutturali degli edifici critici devono essere valutate per garantire la sicurezza delle funzioni di salvataggio e/o di emergenza all'interno della struttura.

In tale quadro, i dati e le informazioni raccolte sono certamente utili per migliorare le conoscenze sullo stato di salute e le prestazioni di una struttura sanitaria nel corso del tempo. Così, anche gli interventi di gestione e manutenzione e gli investimenti possono essere indirizzati verso determinati sottosistemi o impianti secondo una priorità razionale. Tuttavia, la combinazione di piani di monitoraggio con strategie di base di avvertimento e di controllo precoce può migliorare ulteriormente la sicurezza complessiva della struttura

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

sanitaria. Possibili applicazioni sono l'arresto di ascensori e di sistemi critici e la chiusura delle valvole in caso di danni ai sistemi di distribuzione. Infine, la possibilità di avere uno scenario sulle prestazioni di strutture e sottosistemi in pochi minuti dopo il sisma può aiutare il personale nella gestione delle emergenze e nell'identificazione degli interventi richiesti (ad esempio, la sostituzione di componenti in sistemi di distribuzione) per mantenere l'ospedale pienamente operativo.

Come risultato finale, la continua valutazione delle condizioni e delle prestazioni di strutture sanitarie svolge un ruolo primario nella quantificazione dell'impatto a breve termine dei terremoti e del processo di deterioramento a lungo termine causato da invecchiamento e fatica. Inoltre, le anomalie possono essere rilevate elaborando i dati in arrivo.

Allo stesso tempo, la calibrazione dei modelli strutturali disponibili può migliorare la capacità dei calcoli strutturali per formulare stime attendibili di prestazione sismica, incluso l'effetto di terremoti su attrezzature ed impianti secondo formulazioni semplificate o addirittura attraverso il calcolo degli spettri di piano (Ministero della Salute 2003). Infine, una conoscenza approfondita sulle caratteristiche sismiche del sito (come zona dell'epicentro, sismicità, ecc) fornisce ulteriori informazioni utili. L'accrescimento del database nel tempo migliora le capacità di analisi e la caratterizzazione dettagliata della sismicità e del comportamento strutturale, consentendo previsioni più attendibili della risposta strutturale.

Le diverse applicazioni di cui sopra, relative alle condizioni operative e di eventi estremi, hanno esigenze diverse in termini di affidabilità e velocità di comunicazione. I recenti progressi nel campo dell'Information and Communication Technology permettono il monitoraggio in tempo reale delle strutture. Tuttavia, le conseguenze di eventi estremi sui sistemi di trasmissione dati devono essere presi in analisi quando si considerano le applicazioni di allarme rapido e di gestione delle catastrofi.

3.3 PROGETTAZIONE DI UNA SHF

Per realizzare un'efficiente SHF è possibile seguire una progettazione che risponda a criteri che vanno dalla A alla E, utilizzando la terminologia specifica in lingua inglese:

- *Accuracy* - Accuratezza;
- *Budget compliance* - Sostenibilità economica;
- *Computational burden* - Sostenibilità computazionale;
- *Durability* - Durabilità;
- *Ease of use* - Facilità d'uso.

In una prima fase, *Accuracy*, si rende indispensabile l'individuazione delle grandezze fisiche da misurare e quindi le tipologie di sensori da adottare per i diversi componenti strutturali e non strutturali, apparecchiature ed impianti. Per quanto riguarda la scelta dei sensori, essi devono essere in grado di valutare la risposta del sistema sia in condizioni operative che nel caso di un evento sismico. Il tipo di

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

senso dipende, quindi, dalle esigenze del monitoraggio. Mentre per una valutazione globale della struttura è sufficiente l'installazione di un numero non elevatissimo di accelerometri solo sulle parti strutturali, differenti sensori e strategie di elaborazione dati sono invece necessari per elementi non strutturali. Ad esempio, i collegamenti e gli ancoraggi di serbatoi, grandi dispositivi medici (CAT scanner, macchine Xray) possono essere efficacemente monitorati da estensimetri. Per monitorare gli impianti di distribuzione è possibile l'utilizzo di sistemi di misura distribuiti basati su sensori FBG. Misure di pressione sono richieste nel caso di tubazioni e serbatoi. Apparecchiature mediche sensibili alle vibrazioni richiedono misure di accelerazione.

A fronte dell'analisi dei danni subiti dai differenti componenti a seguito di un evento sismico, sono state individuate le grandezze fisiche che ne possono definire la performance. Una sintesi delle tipologie di sensori e le loro applicazioni nella determinazione dello stato di salute di complessi ospedalieri è riportata in Tabella 3.4.

| Scopo | Obiettivo del monitoraggio | Sensori |
|-----------------------|---|---|
| | Valutazioni delle prestazioni della struttura in generale | Accelerometri ad alta sensibilità |
| Sicurezza strutturale | Dettagli strutturali (connessioni, nodi...) | Strain-gauges, trasduttori di spostamento, fibra ottica |
| | Fondazioni (cedimenti differenziali, liquefazione) | Sensori in fibra ottica |
| Sicurezza | Connessioni e ancoraggio | Strain-gauges, |

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

| Scopo | Obiettivo del monitoraggio | Sensori |
|--|---|--|
| elementi non strutturali | | trasduttori di spostamento |
| | Apparecchiature mediche sensibili alle vibrazioni (CAT scanner, macchina X-ray) | Accelerometri, trasduttori di spostamento |
| | Scorrimento condotte di distribuzione | Sensori in fibra ottica |
| | Perdite in serbatoi e sistemi di distribuzione | Sensori di pressione |
| | Antenne e parafulmini | Anemometro, sensori di corrosione, accelerometri |
| | Impianti riscaldamento e condizionamento dell'aria, tubazioni, connessioni, valvole | Sensori di umidità, sensori in fibra ottica, sensori di temperatura, sensori di pressione, accelerometri |
| Sicurezza basata sulla capacità funzionale | Sistemi di protezione antincendio | Sensori di pressione |
| | Allarmi attivazione/ disattivazione | Accelerometri, trasduttori di spostamento |
| | Ascensori | Switches |
| | Valvole di chiusura | Switches |
| Rischio | Rischio sismico | Accelerometri, velocimetri, sismometri |

Tabella 3.4 - Tipologia di sensore e campo di applicazione.

Individuati i sistemi da monitorare e specificate le grandezze fisiche da rilevare, diventa fondamentale la scelta dei sensori e l'architettura del sistema di monitoraggio tra le varie opportunità che il mercato odierno offre. Quest'aspetto incide pesantemente sul fattore economico di tutto il sistema (*Budget compliance*). Utilizzare sistemi locali distribuiti che elaborano localmente i dati e trasferiscono informazioni ad un server

centrale sfruttando connessioni wireless consente di ridurre i costi ed avere un bassissimo impatto sulle normali funzionalità dell'ospedale.

Qualora sia possibile, collegare i vari sistemi di monitoraggio locale ad una rete LAN già esistente aiuta nella gestione dei costi. Utilizzare, invece, sistemi cablati non è conveniente da un punto di vista economico e funzionale. I costi relativi al cablaggio sono maggiori in quanto sono necessari attraversamenti in canaline schermate e vanno ad incrementare la complessità dei già articolati impianti ospedalieri, rischiando altresì di alterare le misurazioni.

La scelta dell'architettura dipende dal tipo di sistema di monitoraggio da adottare (globale o locale) e dalla scelta di sistemi che operano in continuo oppure a trigger. Una scelta adeguata per ogni tipo di applicazione consente di gestire al meglio l'onere di calcolo (*Computational burden*). Ad esempio, per il monitoraggio della componente strutturale dell'intero complesso ospedaliero sarà necessaria un'architettura globale che prevede l'installazione di accelerometri distribuiti in maniera opportuna, in modo da poter valutare il comportamento dinamico dell'intera struttura. Questo sistema di monitoraggio dovrà essere in grado di elaborare in maniera continua, 24h su 24h, ed in breve tempo i dati provenienti dai vari sensori e fornire informazioni su eventuali stati di danneggiamento. Per sviluppare un sistema di monitoraggio della componente strutturale, è necessario, quindi, l'impiego di procedure automatizzate che, a partire dalle registrazioni, forniscono informazioni sul comportamento dinamico senza l'interazione continua da parte

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

dell'utente. Quindi, si necessita di un algoritmo in grado di elaborare i dati in tempi brevi ed capace di fornire informazioni sulle caratteristiche dinamiche della struttura.

A partire dalla determinazione delle forme modali è possibile trarre informazioni sullo stato di danneggiamento della componente strutturale.

Altra strategia può essere utilizzata, ad esempio, per il monitoraggio di una tubazione di gas. In questo caso si disporrà di un sistema locale in prossimità della tubazione, che necessita la misurazione in continuo dello spostamento relativo della giunzione tra due condotti, in modo da valutarne l'integrità a seguito dell'evento sismico. Altro tipo di approccio, invece, può essere utilizzato per valutare le vibrazioni di macchinari medici (CAT scanner, macchine Xray). Quest'applicazione deve provvedere alla misurazione dell'accelerazione che l'apparecchiatura subisce solamente a seguito di un evento sismico, quindi si disporrà di un'architettura locale di tipo trigger, che si attiverà al raggiungimento di una determinata soglia.

Un ulteriore aspetto che bisogna garantire nella progettazione di una SHF è la durabilità del sistema (*Durability*). Sensori, cavi e collegamenti devono garantire la durabilità del sistema e la qualità dei dati. Sostituzioni e manutenzioni di componenti non devono causare interruzioni del monitoraggio della struttura ospedaliera.

Una SHF così concepita, deve fornire informazioni facilmente intellegibili da parte dell'utente decisore (*Ease of use*). A questi è affidato il compito di definire l'operatività e quindi l'utilizzo della

struttura sanitaria a seguito dell'evento sismico. Egli, tramite accesso in remoto alla struttura ospedaliera, è in grado di interrogare il sistema di monitoraggio e valutare le parti strutturali, non strutturali, impiantistiche ed apparecchiature che hanno subito danni a seguito dell'evento sismico e quindi definire l'operatività dei vari reparti della struttura. In questo modo è possibile pianificare al meglio la gestione dell'emergenza post sisma. Un sistema di monitoraggio così concepito non solo è in grado di definire lo stato di salute dei vari componenti a seguito di un evento sismico, ma è funzionale nella gestione della struttura durante il suo ciclo di vita, ottimizzando gli interventi di manutenzione.

3.4 STRATEGIA DI SVILUPPO DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO A SUPPORTO DI PRESID OSPEDALIERI

Con riferimento a quanto esposto finora, di seguito si vogliono esaminare le varie soluzioni che il mercato propone per il monitoraggio della componente strutturale, di apparecchiature ed impianti in complessi ospedalieri. Questa panoramica vuole definire un possibile layout ideale di una SHF, ma per la reale applicazione bisogna tenere sempre in considerazione il costo del sistema di monitoraggio e le questioni funzionali ed organizzative della struttura ospedaliera. Quindi, un sistema di monitoraggio funzionale deve

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

essere correttamente progettato per ciascun specifico Presidio Ospedaliero.

Per il monitoraggio dei componenti maggiormente vulnerabili della struttura ospedaliera, si propone l'utilizzo di un'architettura distribuita che consente la comunicazione di tutti i dispositivi di misura mediante rete wireless. Un esempio dell'architettura rappresentata in Figura 3.8, è realizzabile mediante sistemi di misura wireless (Wireless Sensor Network WSN). Una rete di sensori WSN è una rete wireless composta da dispositivi autonomi spazialmente distribuiti che utilizzano sensori per monitorare le condizioni fisiche o ambientali. Questi dispositivi autonomi, noti come router e nodi di estremità, si combinano con un gateway per creare un tipico sistema WSN. I nodi di misura distribuiti comunicano in modalità wireless ad un gateway centrale, che funge da coordinatore della rete e trasferisce informazioni ad un server centrale, dove è possibile raccogliere, elaborare, analizzare e visualizzare i dati.

Il sistema Wireless Sensor Network (WSN) è basato su una rete wireless. La radio 802.15.4 in ogni dispositivo WSN prevede la comunicazione a bassa potenza dei dati di misura attraverso una vasta rete di dispositivi.

Di seguito si analizzano nel dettaglio i vari sottosistemi del sistema di monitoraggio, valutando e scegliendo adeguatamente i componenti necessari, prendendo in considerazione le problematiche ed i criteri esposti sinora.

3.4.1 Sistema di monitoraggio strutturale

Il sistema di monitoraggio della componente strutturale ha lo scopo di fornire informazioni sullo stato di salute della struttura definendo e localizzando danni strutturali. Questo sistema si basa su misure di vibrazione dalle quali si ricavano informazioni su frequenze e modi di vibrazione globali della struttura, da cui, tramite algoritmi di calcolo, è possibile ricavare informazioni sullo stato di danneggiamento.



Figura 3.9 - Accelerometri piezoelettrici.

Per misure di vibrazione di qualità, si devono utilizzare accelerometri ad elevata sensibilità. Da un'analisi e dal confronto tra le varie proposte che il mercato attuale offre, sono state individuate tre tipologie di accelerometri piezoelettrici mod. 393B31, 393B12 e 393B05 (Figura 3.9). Si tratta di accelerometri piezoelettrici unidirezionali aventi sensibilità 10 V/g e fondo scala di ± 0.5 g.

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

Gli accelerometri devono essere fissati alla struttura mediante interposizione di piastra rigida, in modo da non alterare il range di frequenza investigabile. Il loro dislocamento sulla struttura avviene in maniera tale da consentire l'identificazione del maggior numero di forme modali. Generalmente è necessario installare un quantitativo di sensori per piano non inferiore a quattro, posizionati nelle due direzioni del piano in spigoli contrapposti, in modo da poter identificare anche componenti torsionali.

Il quantitativo ed il posizionamento dei sensori dipende dall'ammontare del budget a disposizione e dalla complessità della struttura da monitorare.

I vari sensori devono essere collegati ad una centralina di acquisizione dati tramite cavi coassiali a bassa impedenza. Per i sensori in questione si possono utilizzare cavi coassiali del tipo RG-58 con connettori BNC per attacco centralina e MIL-C-5015 per connessione al sensore (Figura 3.10).



Figura 3.10 - Cavo coassiale per accelerometri piezoelettrici con attacco MIL-C-5015 - BNC (www.pcb.com).

Essendo cavi molto sensibili al rumore, devono essere fissati alla struttura e percorrerla in apposite canaline sino alla centralina in modo da evitare interferenze con gli impianti presenti.

L'hardware di acquisizione individuato è costituito da un modulo a quattro canali installato su un controller modulare (Figura 3.11). Il modulo è ideale per l'acquisizione del segnale dinamico ed è adatto per misure di frequenza. Fornisce un range dinamico di 102dB. I quattro canali in input eseguono la digitalizzazione simultanea dei segnali a frequenza massima di 51.2 kHz per canale ed includono filtro aliasing.



Figura 3.11 - Chassis modulare e moduli per l'acquisizione di accelerometri e sensori di temperatura.

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

L'hardware modulare (Figura 3.11) è un sistema embedded configurabile per il controllo e l'acquisizione dati. Essendo questo programmabile dall'utente, può ospitare al suo interno moduli per l'acquisizione di segnali differenti e quindi può essere utilizzato per l'acquisizione dei dati provenienti da altri componenti strutturali. Si tratta di una centralina modulare che consente l'utilizzo di un minimo di 4 ad un massimo di 16 moduli e deve essere calibrata con il sistema di monitoraggio che si sta progettando.

La trasmissione dei dati al PC può avvenire tramite rete wireless collegando la centralina ad un router wireless.

Utilizzando la rete wireless è possibile dislocare l'hardware di misura ad ogni piano monitorato, in modo da evitare il passaggio dei cavi tra i vari livelli ed evitando di compromettere la qualità delle misure. Quando si utilizzano sistemi di trasmissione wireless bisogna tenere in considerazione possibili problematiche relative alla sincronizzazione dati. Una possibile soluzione è fornita dall'utilizzo di modulo GPS.

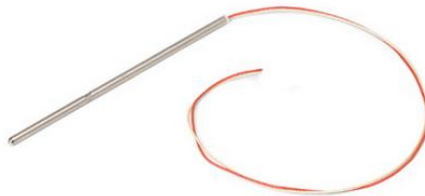


Figura 3.12 - Termocoppia tipo T.

Le misure di vibrazione sono affiancate da misure di temperatura esterna, in modo da poter valutare le variazioni delle caratteristiche dinamiche della struttura, in termini di frequenze e forme modali, con l'effetto termico ambientale. Per queste misure di temperatura è possibile utilizzare termocoppie di tipo T con conduttori in rame e costantina, capaci di rilevare temperature fino a 482° C (Figura 3.12). Per l'acquisizione del segnale proveniente dalla termocoppia, il controller deve essere integrato da un modulo che deve includere un converter analogico-digitale delta-sigma, filtri antialias, rilevamento per termocoppia aperta e compensazione del giunto freddo.

I componenti appena descritti sono stati individuati per il monitoraggio in continuo degli elementi strutturali. Una struttura ospedaliera si compone di diversi corpi di fabbrica, per cui il monitoraggio strutturale deve essere implementato separatamente per ciascuno di essi, quindi, si avranno informazioni sullo stato di salute di ogni struttura monitorata.

3.4.2 Apparecchiature

Il monitoraggio di apparecchiature, come CAT scanner e macchine X-Ray, è fondamentale per la gestione dell'emergenza post-sisma. Queste attrezzature sono molto sensibili alle vibrazioni, per cui, se l'azione sismica è rilevante, questi possono subire danneggiamenti a causa dell'eccessiva accelerazione subita. Per tale motivo, un controllo del loro corretto funzionamento si basa sul monitoraggio delle vibrazioni,

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

verificando che queste non eccedano la massima accelerazione tollerabile dal macchinario.

Questo è un sistema che non fornirà dati in continuo come accade per le misure di vibrazione strutturale, ma si attiverà solamente al raggiungimento di una soglia di trigger prefissata, superata la quale i dati verranno scritti su database. Impostando un pre-trigger di 10 secondi ed un post-trigger di 1 minuto si riesce ad ottenere l'acquisizione delle vibrazioni per la durata dell'intero evento sismico.

Per la misura delle vibrazioni dei macchinari, sono stati individuati sensori di tipo PCB 356M98 (Figura 3.13) che ben si prestano alle specifiche richieste. Sono sensori piezoelettrici con meccanismo a taglio. Hanno sensibilità di 1 V/g, range di frequenza tra 0.5 e 3000 Hz, fondo scala di ± 5 g.



Figura 3.13 - Accelerometro triassiale PCB 356M98 (www.pcb.com).

Il modulo e lo chassis di acquisizione sono i medesimi individuati per il monitoraggio delle componenti strutturali.

Come detto per il sistema di monitoraggio strutturale è necessario affiancare al modulo per l'acquisizione delle accelerazioni un modulo GPS per la sincronizzazione dei dati e un router wireless per il trasferimento dei dati.

L'eccessivo livello di vibrazione non è il solo elemento da monitorare per quanto riguarda le apparecchiature. Ciò che è necessario controllare, insieme alle accelerazioni, sono i supporti a cui esse sono fissate. Data la loro imponente massa, queste, a causa dell'accelerazione indotta dal sisma, sottopongono i supporti ad elevate sollecitazioni e ne possono compromettere l'utilizzo nelle fasi di soccorso.

Per ricevere informazioni sullo stato dei supporti, si possono utilizzare strain gauge (Figura 3.14). Questi sono particolari sensori progettati per misurare le deformazioni.



Figura 3.14 - Strain gauge.

3.4.3 Impianti

Il monitoraggio della componente impiantistica deve prevedere il controllo del corretto funzionamento di tubazioni di gas, acqua, gas

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

medicali e serbatoi. I parametri da tenere in costante controllo sono gli spostamenti relativi delle tubazioni, le giunzioni ed i supporti di fissaggio di serbatoi ed altre componenti impiantistiche.

In merito al monitoraggio dei serbatoi ed impianti (Figura 3.15), è possibile utilizzare la medesima strumentazione proposta per il monitoraggio della componente strutturale, effettuando opportune valutazioni tra la massa del sensore e del serbatoio. Come riportato in precedenza per la componente strutturale, si prevede l'utilizzo di accelerometri connessi ad una centralina modulare (Figura 3.11).



Figura 3.15 - Esempio di impianto in complesso ospedaliero.

Invece, per il monitoraggio della tubazione e delle giunzioni è possibile utilizzare sensori in fibra ottica (FBG), capaci di rilevare stati tensionali e deformativi della condotta e la sua temperatura (Figura

3.16). Il sensore, della lunghezza di 6 m, è composto da 5 fibre FBG con lunghezza d'onda standard. Ad un incremento/riduzione della lunghezza d'onda corrisponde un incremento/decremento della deformazione.

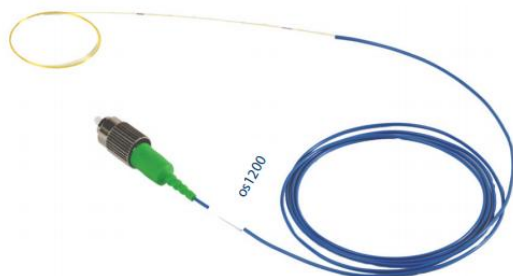


Figura 3.16 - Sensore in fibra ottica os-1200 (www.micronoptics.com).

L'acquisizione avviene tramite modulo che include un processore ottico, in grado di combinare un laser con lunghezza d'onda a basso rumore ad elevata potenza. Ogni canale ottico include un intervallo di lunghezza d'onda 80 nm (da 1510 a 1590 nm), in grado di eseguire la scansione fino a 20 sensori FBG per canale (oltre 80 sensori FBG per modulo).

Il sistema di monitoraggio degli impianti deve tenere sotto osservazione continua i valori di pressione dei singoli componenti. Questo deve essere garantito tramite sensori di pressione. In tale circostanza non verrà trattato il monitoraggio della pressione all'interno di serbatoi e condotte. Esso dipenderà dalle specifiche degli

Capitolo 3 - Il paradigma della 'Smart Health Facility'

impianti da monitorare, che attualmente non sono valutabili e dipendono da applicazioni specifiche.

Si precisa come, l'architettura finora descritta, è stata effettuata sulla base delle soluzioni tecnologiche che il mercato odierno offre e che può essere adottata per un sistema di monitoraggio di una generica struttura ospedaliera. Ovviamente, la scelta ottimale dei sensori e della trasmissione dati deve essere effettuata tenendo conto della disponibilità economica, delle tipologie dei componenti strutturali e non strutturali e degli aspetti funzionali.

CAPITOLO 4

CARATTERIZZAZIONE

DEL DANNO

Nel capitolo precedente è stato affrontato il problema della definizione di un'architettura adeguata per il monitoraggio della componente strutturale e non strutturale di una struttura sanitaria, individuando i sensori maggiormente idonei a definire lo stato di salute di ciascun sub-sistema. Diverse sono le tipologie di trasduttori da adottare. Questi misurano la grandezza fisica d'interesse in un preciso istante di tempo e per un tempo continuato. I dati provenienti dai differenti sensori non rilevano il danno, ma necessitano dell'implementazione di processi per la sua identificazione. Ad esempio procedure per l'identificazione del danno possono essere sviluppate a partire dalla misura delle vibrazioni della componente strutturale in condizioni di rumore ambientale. Queste procedure consistono nel misurare la risposta dinamica di una struttura per un periodo di tempo prolungato al fine di definire degli indici di danno che, interpretati attraverso

Capitolo 4 - Caratterizzazione del danno

appropriate tecniche di analisi statistica, consentono una valutazione in remoto dello stato di salute delle strutture in presenza di fenomeni di degrado ovvero a seguito di eventi calamitosi quali i terremoti.

I moderni sistemi di monitoraggio lavorano in continuo e definiscono eventuali stati di danneggiamento in tempo quasi reale, ma presentano delle limitazioni in termini di possibilità di identificazione della tipologia ed estensione del danno e quantificazione della vita utile residua. Eventualmente, in combinazione con tecniche di prova non distruttive, consentono una tempestiva valutazione del danno e l'ottimizzazione degli interventi di ripristino o manutenzione.

Il danno può essere definito come un cambiamento intenzionale o non delle proprietà materiali e/o geometriche di una struttura, inclusi i cambiamenti delle condizioni al contorno e dei vincoli, che incidono negativamente sulle prestazioni attuali e future. Ragionando in termini di scale di grandezza, il danno inizia a livello del materiale e come tale è presente in una certa misura in tutti i sistemi strutturali. Sotto appropriate condizioni di carico, il danno a livello del materiale avanza a livello di componenti e di sistema con velocità e modalità differenti. Al progredire del danno il collasso si verifica quando il sistema non è più in grado di svolgere la funzione prevista. Spesso il collasso è definito in termini di superamento di una soglia (di resistenza, stabilità, deformazione). La struttura spesso può continuare a svolgere la sua funzione anche se il danno è progredito oltre i livelli limite di progetto, ma di solito le sue prestazioni sono ad un livello ridotto.

In termini di scale temporali, il danno può accumularsi gradualmente durante lunghi periodi di tempo, come nel caso di danno associato alla fatica/usura o alla corrosione. Il danno può però anche progredire molto velocemente, ad esempio a seguito di eventi calamitosi.

Il presente capitolo offre una panoramica riguardante il monitoraggio strutturale basato sull'analisi delle variazioni dei parametri modali. Tali approcci all'identificazione del danno si basano, infatti, sull'assunto che, nella maggior parte dei casi pratici, i cambiamenti in un sistema strutturale causati dal danno si manifestano come variazioni delle caratteristiche di massa, rigidità e dissipazione di energia del sistema e, dunque, come variazioni dei parametri modali. Talvolta, il danno si manifesta anche come variazione delle condizioni al contorno di una struttura: queste pure determinano cambiamenti della sua risposta dinamica.

4.1 STATISTICAL PATTERN RECOGNITION

Nella definizione data di danno è implicito che la sua identificazione dipende dal confronto tra due differenti stati del sistema, uno dei quali si assume per rappresentare lo stato iniziale di riferimento in assenza di danno. Nel contesto del monitoraggio strutturale occorre, dunque, associare i dati misurati ad un eventuale danno, distinguendo la condizione "sana" da quella "danneggiata" di una struttura. Tale riconoscimento, può essere operato secondo approcci diversificati (Schakoff, 1992).

Capitolo 4 - Caratterizzazione del danno

Un possibile approccio è quello basato sulla "*statistical pattern recognition*" (SPR). Il concetto dell'apprendimento basato su insiemi di stime di riferimento ("training data") può essere utilizzato come mezzo per realizzare modelli di riconoscimento. Da un punto di vista generale, un approccio al monitoraggio strutturale basato sulla "*statistical pattern recognition*" si articola in quattro fasi (Farrar et al., 2001):

- 1) Valutazione operativa;
- 2) Acquisizione dati;
- 3) Selezione degli indici di danno;
- 4) Modelli statistici per la funzione di discriminazione.

La normalizzazione dei dati, la selezione, la compressione e la fusione sono processi inerenti alle fasi 2 e 4. Questi processi possono essere implementati sia a livello hardware che software. Di solito si adotta una combinazione dei due. Il concetto di apprendimento automatico entra in questo paradigma principalmente nelle fasi 3 e 4.

Per apprendimento automatico s'intende l'associazione automatizzata tra alcune caratteristiche derivate da dati misurati (step 3) e lo stato di danno della struttura. Se tale relazione esiste ma non è nota, il problema di apprendimento consiste nello stimare la funzione che descrive questa relazione usando dati acquisiti da test sulla struttura ("training data"). Questo processo di valutazione è il punto centrale della fase 4.

I problemi di apprendimento si dividono generalmente in due classi. Se i dati di training provengono da classi multiple e le etichette per i

dati sono note, il problema è quello dell'apprendimento supervisionato. In caso contrario, si possono tentare solo valutazioni basate su relazioni intrinseche tra i dati: in questo si parla di apprendimento non supervisionato. L'apprendimento non supervisionato può essere usato anche per costruire un modello per una singola classe di danno che può essere poi usata per testare nuovi dati per coerenza con quella classe.

Al fine di elaborare quest'ultimo punto, è utile esaminare anche altri possibili approcci al monitoraggio strutturale: gli approcci basati sulla risoluzione di un "problema inverso" e quelli "basati sui dati". L'approccio mediante soluzione di un "problema inverso" è di solito implementato costruendo un modello fisicamente basato della struttura d'interesse: si tratta solitamente di un modello agli elementi finiti (FE). Una volta che viene costruito il modello basato su una dettagliata descrizione fisica del sistema, esso viene di solito aggiornato a partire dai dati misurati sulla struttura reale. Questo aggiornamento evidenzia un punto importante: è veramente difficile costruire un accurato modello fisicamente basato di una struttura. L'informazione o l'intuizione risulterà inevitabilmente carente in molti settori; inoltre alcuni aspetti risultano di difficile o comunque, non univoca modellazione. Un altro problema riguarda l'accuratezza nella valutazione delle proprietà dei materiale: questo è un problema comune per le strutture in cemento armato. La fase di aggiornamento, adatta il modello costruito in modo tale da renderlo il più aderente possibile ai dati misurati nella struttura reale. La struttura matematica

Capitolo 4 - Caratterizzazione del danno

per le procedure di aggiornamento è basata su strumenti di algebra lineare (Friswell & Mottershead, 1995). Dopo l'aggiornamento, si ha un modello accurato della struttura d'interesse nella sua condizione normale. Quando sono disponibili i dati da una successiva fase di monitoraggio, un ulteriore aggiornamento del modello indicherà l'insorgere di eventuali cambiamenti strutturali la loro posizione ed estensione, pervenendo così a una diagnosi del danno.

L'approccio *data-driven*, invece, stabilisce un set di dati di training per tutti i possibili stati di interesse della struttura, e si avvale di un modello di riconoscimento per assegnare a dati misurati nella fase di monitoraggio l'etichetta della classe diagnostica relativa. Al fine di realizzare il modello di riconoscimento, è necessario definire un modello statistico dei dati.

Entrambi gli approcci presentano vantaggi e svantaggi; una discussione dettagliata è riportata in Barthorpe (2011). In ogni caso, la distinzione tra le due filosofie non è così netta come si potrebbe pensare. Entrambi gli approcci, infatti, dipendono dalla disponibilità di dati per la definizione e l'aggiornamento di un modello, che può essere un modello fisico oppure un modello statistico.

La fase di valutazione operativa tenta di fornire risposte alle quattro domande riguardanti l'implementazione di un'indagine di identificazione del danno:

- 1) Quali sono le motivazioni economiche o di protezione della vita per eseguire il monitoraggio strutturale?

- 2) Com'è definito il danno per il sistema oggetto d'indagine e, per molteplici possibilità di danno, quali sono i casi più preoccupanti?
- 3) Quali sono le condizioni operative ed ambientali?
- 4) Quali sono le limitazioni sull'acquisizione dei dati nella condizione di esercizio?

La valutazione operativa è funzionale alla definizione degli obiettivi e dei limiti del monitoraggio: in tal modo si cerca di adattare il processo di identificazione del danno a caratteristiche uniche della struttura da controllare e del danno da rilevare.

La fase di acquisizione dei dati nel processo di monitoraggio strutturale implica la selezione del tipo, del numero e del posizionamento dei sensori, e dell'hardware di acquisizione/memorizzazione/trasmissione dei dati. In questa fase le considerazioni economiche giocano un ruolo fondamentale nel prendere decisioni riguardanti l'hardware di acquisizione dei dati da usare per il sistema di monitoraggio strutturale.

Il processo di separazione delle variazioni nella risposta misurata del sistema causate da variabili operative e/o ambientali da quelle indotte dal danno è indicato come processo di normalizzazione dei dati. Dato che i dati di risposta del sistema sono spesso misurati a varie condizioni operative e ambientali, la capacità di normalizzare i dati diventa molto importante nel processo di identificazione del danno; senza questo, le variazioni nelle risposte misurate causate da

Capitolo 4 - Caratterizzazione del danno

cambiamenti nelle condizioni operative e ambientali potrebbero essere erroneamente scambiate per effetti del danno.

La pulizia dei dati è il processo di scelta selettiva dei dati da trasmettere o da respingere nel processo di selezione degli indici di danno. Il processo di selezione dei dati è di solito basato sulla conoscenza acquisita da persone coinvolte direttamente nell'acquisizione dei dati. Ad esempio, un'ispezione del layout di prova potrebbe rilevare che un sensore è stato montato in modo non ben saldo e quindi è basata sul giudizio della persona che sta effettuando la misurazione; questa serie di dati o i dati ottenuti da questo particolare sensore potrebbero essere cancellati selettivamente da un processo di selezione delle caratteristiche. Tecniche di elaborazione del segnale come filtraggio e ricampionamento possono essere considerate come procedure di pulizia dei dati.

L'implementazione operativa delle tecnologie di misurazione necessarie per l'esecuzione di un monitoraggio strutturale produce una grande quantità di dati. Una condensazione dei dati è vantaggiosa e necessaria quando sono previsti confronti di molti set di indici ottenuti per tutta la durata della vita della struttura. Inoltre, poiché i dati saranno acquisiti per un periodo di tempo prolungato e in condizioni operative, devono essere sviluppate consistenti tecniche di riduzione dei dati per preservare la sensibilità alle variazioni strutturali di interesse in presenza di variabilità ambientale e operativa.

La fusione dei dati è il processo di combinazione delle informazioni provenienti da fonti multiple nel tentativo di migliorare la fedeltà del

processo di rilevamento danni. Il processo di fusione può associare i dati provenienti da sensori dello stesso tipo distribuiti spazialmente o, in alternativa, tipi di dati eterogenei: ad esempio, misure di risposte cinematiche (per esempio le accelerazioni) possono essere correlate a misurazioni di parametri ambientali (ad esempio la temperatura) e misure di parametri operativi (per esempio il volume di traffico su un ponte) al fine di valutare la presenza o meno di danno. La fusione dei dati è, dunque, strettamente collegata ai processi di normalizzazione, selezione e compressione dei dati.

La parte del processo di monitoraggio strutturale che indiscutibilmente riceve maggiore attenzione nella letteratura tecnica è l'identificazione di indici dei dati che permette di distinguere stati danneggiati e non danneggiati per le strutture di interesse (Doebling et al., 1996; Sohn et al., 2004). Un indice di danno viene estratto dai dati di risposta del sistema misurato e denota la presenza, o meno, di danno nella struttura. Generalmente, è richiesto un certo grado di elaborazione del segnale per estrarre indici efficaci.

Altra parte del processo di monitoraggio strutturale che ha senza dubbio ricevuto la minore attenzione nella letteratura tecnica è lo sviluppo di modelli statistici per la distinzione dei valori degli indici associati a strutture integre o danneggiate. Lo sviluppo di un modello statistico consiste nell'implementazione degli algoritmi che operano sulle caratteristiche estratte per quantificare lo stato del danno della struttura.

Capitolo 4 - Caratterizzazione del danno

Lo stato di danno di un sistema può in linea di principio essere identificato attraverso un processo gerarchico organizzato in cinque fasi (Rytter, 1993). Questo processo cerca di rispondere alle seguenti domande:

1. È presente un danno (danno esistente)?
2. Dove si trova il danno (localizzazione)?
3. Che tipo di danno è presente?
4. Quanto è grave il danno (estensione)?
5. Quanta vita utile resta (prognosi)?

Le risposte a queste domande nell'ordine presentato definiscono un livello di conoscenza crescente circa lo stato di danno. Quando vengono applicati ad un metodo di apprendimento non supervisionato, i modelli statistici possono di solito essere usati per rispondere a domande riguardanti l'esistenza (e a volte, ma non sempre, la localizzazione) del danno. Quando vengono applicati in metodologie di apprendimento supervisionato e associati a modelli analitici, le procedure statistiche possono, in linea di principio, essere usate per determinare il tipo di danno, l'estensione del danno e la vita utile rimanente della struttura.

4.2 ALCUNI ASSIOMI FONDAMENTALI DEL

MONITORAGGIO STRUTTURALE

Prima di procedere all'analisi degli indici di danno più frequentemente utilizzati nell'ambito del monitoraggio strutturale basato sui parametri modali, è opportuno ribadire alcuni concetti fondamentali.

- *La valutazione del danno richiede un confronto tra lo stato di due sistemi.*

Il fatto che gli algoritmi di rilevamento del danno richiedano un confronto degli stati del sistema è alla base di uno dei principali problemi nel monitoraggio strutturale (SHM). Se la condizione normale o lo stato di base cambia come risultato delle variazioni ambientali e operative, l'applicazione di un nuovo algoritmo di rilevamento può fornire un'indicazione del danno falsamente positiva.

- *L'identificazione dell'esistenza e della localizzazione del danno può essere fatta secondo modalità di apprendimento non supervisionato, ma l'identificazione del tipo di danno presente e della sua gravità può generalmente essere condotta solo in modo supervisionato.*

La classificazione statistica nell'ambito del monitoraggio strutturale consiste nell'applicazione di algoritmi che, operando sugli indici di danno, quantifichino lo stato di danno della struttura. Le procedure statistiche possono, in teoria, essere usate per determinare il tipo e l'estensione del

danno quando sono applicate in modalità di apprendimento supervisionato e sono accoppiate a modelli o dati analitici ottenuti dalla struttura quando sono presenti tipi e livelli di danno noti.

- *I sensori non possono misurare il danno. L'estrazione di indici, attraverso l'elaborazione del segnale e la classificazione statistica, è necessaria per convertire i dati del sensore in informazione sul danno.*

I sensori misurano la risposta di un sistema al suo input, per cui non possono direttamente misurare il danno.

- *Più la misurazione è sensibile al danno e più risulta sensibile al mutare delle condizioni operative ed ambientali.*

Gli indici derivati dai dati misurati non dipendono solo dallo stato di danno ma possono dipendere anche da variabili ambientali o operative. Il problema della stima della funzione di danno richiede, dunque, una preventiva riduzione della dimensionalità del problema in modo da identificare una nuova funzione che dipenda dal danno, ma non dalla temperatura.

- *Esiste un trade-off tra la sensibilità al danno di un algoritmo e la sua capacità di reiezione del rumore.*

Ciò implica la necessità di ridurre il più possibile il livello di rumore nei dati misurati o nelle caratteristiche successivamente estratte.

- *L'entità del danno che può essere rilevata dai cambiamenti delle proprietà dinamiche è inversamente proporzionale al range di frequenza analizzato.*

Generalmente il danno è un fenomeno locale e può non influenzare significativamente la risposta globale a bassa frequenza di una struttura. I modi globali a bassa frequenza della struttura hanno elevate lunghezze d'onda e tendono ad essere insensibili al danno locale. Nel caso di strutture civili, per individuare fenomeni di danno locale occorre pertanto avere elevate frequenze di campionamento e la massima risoluzione spaziale possibile. Ciò influenza la scelta del layout di misura e dei parametri di analisi.

4.3 INDICI DI DANNO

Gli indici di danno sono quantità estratte da misure della risposta strutturale al fine di individuare la presenza di danno in una struttura. L'identificazione di tali indici è uno dei principali argomenti di ricerca nel campo del monitoraggio strutturale e la loro scelta opportuna può semplificare l'identificazione e quantificazione del danno.

L'estrazione degli indici di danno fa riferimento al processo di trasformazione dei dati misurati in forme alternative dove la correlazione con il danno è di immediata osservazione. La selezione degli indici è il processo mediante il quale si sceglie quali di questi utilizzare per la determinazione del danno. Idealmente vengono scelti quelli che sono maggiormente sensibili al danno e che non risentono di

Capitolo 4 - Caratterizzazione del danno

effetti dipendenti da variabilità di condizioni operative e ambientali. Tuttavia, in molti casi reali, gli indici che sono sensibili al danno risultano sensibili anche a fenomeni non legati al danneggiamento. Infine, non esiste un unico indice applicabile ad ogni scenario di danno. Se sono possibili scenari di danno multipli, saranno necessario estrarre differenti indici dai dati per identificare diverse tipologie di danno.

I parametri dinamici della struttura (frequenze e forme modali), estratti da misure di vibrazione, sono tipicamente usati come indici di danno. Tuttavia, è bene precisare che, affinché dalla loro analisi si possa identificare il danno, è necessario che il sistema strutturale esibisca variazioni di rigidità e/o massa. Occorre inoltre tener presente che il danno è un fenomeno locale, che non influenza le basse frequenze e, quindi, la risposta globale della struttura che generalmente viene misurata durante i test. Infine, è opportuno osservare che molte tipologie di danno, infatti, introducono non linearità nel sistema.

La frequenza di risonanza di una struttura è funzione della massa, della rigidità, dello smorzamento e delle condizioni di vincolo. In letteratura sono presenti diversi tentativi di associare le variazioni di frequenza all'insorgenza del danno (Cawley & Adams, 1979).

Considerando un sistema privo di smorzamento, la frequenza naturale del sistema danneggiato e quella del sistema non danneggiato possono essere scritte come:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [4.1]$$

$$\omega_d = \sqrt{\frac{k_d}{m}} \quad [4.2]$$

dove:

ω_n e ω_d sono le frequenze naturali del sistema non danneggiato e del sistema danneggiato; k e k_d sono la rigidità del sistema non danneggiato e quella del sistema danneggiato; m è la massa del sistema. Stimare le frequenze di risonanza del sistema danneggiato e di quello non danneggiato, e assunto che la rigidità del sistema danneggiato sia minore di quella del sistema non danneggiato, la rigidità del sistema danneggiato può essere ricavata come:

$$k_d = (\sqrt{k} - \Delta\omega\sqrt{m})^2 \quad [4.3]$$

dove $\Delta\omega = \omega_n - \omega_d$ è la variazione della frequenza naturale dei due sistemi. Questo approccio può essere esteso ai sistemi a più gradi di libertà adottando una notazione matriciale. La riduzione di rigidità in ogni molla, causata dal danneggiamento, può essere quantificata quando si ha a disposizione un numero di frequenze pari al numero di molle del sistema. Pertanto, non è sempre possibile determinare univocamente tutte le rigidità del sistema. In ogni caso, il metodo

appena descritto rappresenta un approccio inverso che utilizza la variazione di frequenza come indice di danno:

$$\Delta k = f^{-1}(\Delta \omega) \quad [4.4]$$

Il problema inverso si riferisce ad una classe generale di problemi dove i parametri del sistema sono stimati da quantità misurate. Questi problemi spesso non sono risolvibili direttamente, poiché il numero dei parametri incogniti eccede quello delle quantità misurabili. La frequenza di risonanza può, però, essere usata come indice di danno in approcci avanzati per l'identificazione del danno stesso; poiché:

$$\Delta \omega = f(\Delta k) \quad [4.5]$$

L'approccio avanzato consiste nel calcolare la variazione di frequenza per un atteso tipo di danneggiamento. La tipologia di danno, la sua localizzazione ed estensione sono modellate matematicamente. La variazione in frequenza misurata viene confrontata con la variazione in frequenza prevista per quella tipologia di danno. Se la variazione in frequenza misurata corrisponde a quella prevista dal danneggiamento simulato, allora tale danno è presente all'interno della struttura. Alla base dell'utilizzo di tale approccio è necessario fare delle assunzioni:

- la tipologia di danno introdotta nel modello è l'unica che può causare la variazione della frequenza di vibrazione del sistema;

- vi è una corrispondenza uno ad uno tra il danno e la variazione di frequenza.

Sebbene tale approccio in teoria possa essere impiegato con successo anche per localizzare e quantificare il danno, nelle pratiche applicazioni esso consente al più di stabilire la presenza del danno.

L'identificazione del danno dalle variazioni di frequenza ha limitazioni pratiche in molti casi reali. Una prima problematica risiede nella bassa sensibilità al danno delle basse frequenze associate ai modi globali della struttura. Inoltre, essendo la frequenza di risonanza una proprietà globale della struttura, non è possibile localizzare il danno, ma solamente individuarne la presenza. Un'eccezione a tale limitazione si riscontra alle alte frequenze di risonanza a cui sono associati modi locali. In ogni caso, quando si riscontra un cambiamento nella frequenza di risonanza ($\delta\omega$) ne deriva da una variazione di rigidità (δk), come dimostrato dalla seguente relazione:

$$\delta\omega = \frac{d\omega}{dk} \delta k = \frac{1}{2\sqrt{km}} \delta k = \frac{1}{2m\omega} \delta k \quad [4.6]$$

da cui è possibile notare che, ad elevate frequenze, per produrre una variazione consistente in frequenza è necessaria una notevole variazione di rigidità. L'identificazione di modi locali ad elevate frequenze, d'altro canto, comporta la necessità di installare un numero elevato di sensori; inoltre, spesso risulta difficile avere eccitazione sufficiente a frequenze elevate.

Capitolo 4 - Caratterizzazione del danno

Anche le forme modali sono spesso utilizzate come indice di danno. Queste forniscono un'informazione distribuita sulla risposta dinamica della struttura e quindi offrono la possibilità di valutare l'esistenza e la localizzazione del danno.

La possibilità di identificare il danno a partire dalle forme modali dipende da dove esso è localizzato e dalla forma modale che si sta considerando. Un indice basato sulle forme modali e frequentemente utilizzato per l'identificazione del danno è il MAC (Modal Assurance Criterion). Esso rappresenta un indice di correlazione tra due forme modali ed è definito come (Allemang & Brown 1998):

$$\text{MAC}(\{\psi\}_x, \{\psi\}_y) = \frac{|\{\psi\}_x^H \{\psi\}_y|^2}{(\{\psi\}_x^H \{\psi\}_x)(\{\psi\}_y^H \{\psi\}_y)} \quad [4.7]$$

dove $\{\psi\}_x$ e $\{\psi\}_y$ sono due vettori delle forme modali. L'indice MAC può assumere valori compresi tra 0 e 1. Il MAC tra due vettori che hanno una relazione lineare è prossimo a uno, mentre se i vettori sono linearmente indipendenti è prossimo a zero. Effettuando il confronto tra tutte le forme modali si ottiene la matrice dei MAC. Si può facilmente notare come il MAC rappresenti una significativa compressione dei dati: infatti, esso riduce il confronto tra due forme modali ad uno scalare. Con questa notevole compressione si ha, tuttavia, una minore sensibilità nell'identificazione delle piccole variazioni nelle forme modali.

Per l'identificazione di danneggiamenti utilizzando l'indice MAC è necessario effettuare il confronto tra le forme modali prima e dopo il

danneggiamento. Se il danno non ha prodotto variazione nelle forme modali, la matrice dei MAC coincide con buona approssimazione con la matrice identità. Si può, inoltre, facilmente osservare come la variazione del MAC sia in generale molto piccola quando il danno determina solo una variazione di ampiezza degli spostamenti modali, mentre assume valori maggiori quando esso determina anche variazioni di forma.

Il MAC non fornisce informazioni sulla localizzazione del danno. Questo problema può essere risolto utilizzando l'indice CoMAC (Coordinate Modal Assurance Criterion). Per N coppie di vettori modali, $\{\psi\}_x$ e $\{\psi\}_y$, l'indice COMAC per il grado di libertà p è definito come:

$$\text{COMAC}(\{\psi\}_{x_p}, \{\psi\}_{y_p}) = \frac{|\sum_{r=1}^N \psi_{x_{pr}} \psi_{y_{pr}}|^2}{\sum_{r=1}^N \psi_{x_{pr}} \psi_{x_{pr}}^* \sum_{r=1}^N \psi_{y_{pr}} \psi_{y_{pr}}^*} \quad [4.8]$$

dove il pedice i fa riferimento all' i -esima forma modale. A differenza del MAC, l'indice CoMAC viene valutato in corrispondenza di ogni grado di libertà misurato e risulta sensibile alle variazioni di ampiezza. Quindi, in funzione delle variazioni di tale indice è possibile localizzare il danno.

I progressi della ricerca nell'ambito del monitoraggio strutturale hanno portato allo sviluppo di ulteriori indici di danno derivati dalle proprietà dinamiche della struttura. In molti casi tali indici sono ottenuti da interpretazioni fisiche circa gli effetti delle variazioni delle

proprietà strutturali sui parametri modali. Ad esempio, per le strutture che manifestano un comportamento flessionale, un'alternativa all'uso delle forme modali per l'identificazione del danno è rappresentata dalla derivata delle forme modali, la curvatura. La derivazione ha l'effetto di amplificare ogni discontinuità nelle forme modali causate dalla presenza di danno localizzato. Prendendo in considerazione una forma modale di una struttura danneggiata e non danneggiata e considerando una sezione x soggetta ad un momento flessionale $M(x)$, la curvatura in x è data da:

$$v''(x) \approx \frac{M(x)}{EI} \quad [4.9]$$

dove E è il modulo di Young e I il momento d'inerzia della sezione. Da tale equazione è evidente come la curvatura è inversamente proporzionale alla rigidezza flessionale EI . Per un dato momento applicato alla struttura danneggiata e a quella non danneggiata, una riduzione di rigidezza associata ad uno stato di danneggiamento comporta un aumento di curvatura. Quindi, nota la sezione trasversale dell'elemento è possibile identificare il danno a partire dalla variazione della curvatura modale.

Per un elemento trave del quale è stata individuata la forma modale mediante una misurazione discreta in punti equamente distribuiti e posti ad una distanza h , la curvatura modale può essere ricavata utilizzando il metodo alle differenze centrali alla derivata seconda dell' i -esimo grado di libertà, come:

$$v''(\psi_i) \approx \frac{\psi_{i-1} - 2\psi_i + \psi_{i+1}}{h^2} \quad [4.10]$$

È quindi possibile stimare la curvatura modale a partire dai risultati di test di vibrazione.

Un'alternativa all'applicazione del metodo alle differenze centrali per la stima della curvatura consiste nell'interpolare gli spostamenti modali misurati attraverso una funzione di forma della quale calcolare la derivata. In questo modo si ottiene una curvatura continua lungo tutto l'elemento.

Effettuando la differenza in termini assoluti tra le curvature prima e dopo il danneggiamento per ciascuna forma modale e sommando le differenze tra più forme modali, è possibile individuare e localizzare il danno. Per ottenere questo risultato, le forme modali scelte devono essere sensibili al danneggiamento. L'utilizzo di una funzione interpolante prima di stimare la curvatura può, tuttavia, mascherare il danno, in quanto essa tende a smussare la forma reale.

4.4 IDENTIFICAZIONE DINAMICA AUTOMATICA

Come discusso, il monitoraggio strutturale basato sulle vibrazioni rappresenta un'attraente ed efficace strategia per la tempestiva identificazione del danno o di fenomeni di degrado in strutture civili.

L'applicazione estensiva delle tecniche di identificazione del danno basate sui parametri modali non può, pertanto, prescindere dalla disponibilità di robuste e accurate procedure di identificazione

dinamica automatica. Di qui gli intensi sforzi del mondo accademico in questo settore.

Le prime analisi e classificazioni sistematiche delle procedure automatiche di identificazione dinamica output-only sono piuttosto recenti (Rainieri & Fabbrocino, 2010; Rainieri et al., 2011). In particolare, è stata proposta una chiara distinzione tra identificazione automatica e tracciamento dei parametri modali. Nel primo caso è sufficiente una singola registrazione per estrarre i parametri modali in assenza di informazioni a-priori sulle proprietà dinamiche della struttura oggetto di indagine (Rainieri & Fabbrocino, 2010). Nel secondo caso, invece, l'osservazione nel tempo dell'evoluzione dei parametri modali della struttura si basa su un insieme di stime di riferimento (Rainieri et al., 2011). I parametri modali di riferimento possono essere forniti sia da procedure manuali sia da algoritmi automatici di identificazione dinamica. A dispetto della loro minore autonomia, le procedure di tracciamento dei parametri modali risultano vantaggiose rispetto alle procedure di identificazione dinamica automatica per tutte quelle applicazioni che richiedono tempi di risposta ridotti e bassi oneri computazionali. Le tecniche di identificazione dinamica automatica, d'altro canto, sono l'unica opzione possibile quando non sono disponibili stime di riferimento dei parametri modali.

L'efficacia delle procedure di identificazione del danno dipende dall'accuratezza delle stime dei parametri modali. Tuttavia, la maggior parte degli algoritmi di identificazione dinamica automatica

disponibili mostra limiti comuni che influiscono negativamente sulla qualità delle stime. Le principali cause di inaccuratezza sono legate all'uso di soglie impostate staticamente e di parametri che richiedono una calibrazione preliminare. Un primo approccio in grado di superare questi limiti e sufficientemente robusto in presenza di rumore di misura è descritto in (Rainieri & Fabbrocino, 2015). Tuttavia, nel caso di modi debolmente eccitati o in presenza di elevati livelli di rumore, una stima affidabile richiede registrazioni molto lunghe con conseguente incremento degli oneri computazionali e dei tempi di risposta. Qui di seguito viene descritto, invece, un innovativo algoritmo ibrido per l'identificazione dinamica automatica nelle condizioni operative. Tale algoritmo è stato sviluppato in modo da:

- 1) fornire stime accurate e precise dei parametri modali, incluso il rapporto di smorzamento;
- 2) non richiedere la calibrazione iniziale di parametri di analisi il cui valore dipende dall'applicazione;
- 3) garantire un'elevata robustezza rispetto a problemi di falsa o mancata identificazione;
- 4) consentire un efficace controllo degli oneri di calcolo.

Numerosi approcci per l'identificazione dinamica automatica sono attualmente disponibili in letteratura. Alcuni di essi si basano su metodi parametrici (Reynders et al., 2012; Devriendt et al., 2014) mentre altri sono stati sviluppati a partire da metodi di tipo non parametrico (Rainieri & Fabbrocino, 2010; Weijtjens et al., 2014).

L'automazione dei metodi parametrici ha seguito tre direttrici principali:

- 1) sviluppo di algoritmi di identificazione in grado di produrre diagrammi di stabilizzazione estremamente semplici da interpretare (Weijtjens et al., 2014; Peeters et al., 2004);
- 2) definizione di criteri e parametri funzionali a distinguere i poli fisici da quelli spuri (Reynders & De Roeck, 2008; Verboven et al., 2002);
- 3) sviluppo di metodologie per l'interpretazione automatica dei diagrammi di stabilizzazione (Reynders et al., 2012; Scionti & Lanslots, 2004).

L'approccio considerato nel presente rapporto segue tutte e tre queste linee guida di fatto complementari. In particolare, combinando step di analisi relativi a differenti metodologie consolidate di analisi modale output-only e sfruttando i risultati di specifiche indagini sulle performance di tali metodi, tale approccio consente di semplificare l'interpretazione dei diagrammi di stabilizzazione e l'identificazione dei modi strutturali.

Gli algoritmi attualmente disponibili violano almeno una delle quattro condizioni di progetto alla base dello sviluppo della procedura qui descritta. Infatti, con poche eccezioni, gli algoritmi di identificazione automatica disponibili in letteratura richiedono una calibrazione preliminare di soglie e parametri di analisi. Inoltre, non sempre risultano ottimizzati dal punto di vista della robustezza in presenza di

condizioni ambientali e operative variabili, del controllo degli oneri computazionali e dell'affidabilità delle stime.

Gli algoritmi esistenti di identificazione dinamica automatica spesso sottostimano l'importanza di stime accurate e affidabili dei rapporti di smorzamento. La maggiore variabilità delle stime di smorzamento rispetto a quelle di frequenze naturali e forme modali è ben documentata in letteratura. Sebbene essa sia dovuta in parte a intrinseci limiti degli stimatori adottati, l'impiego di appropriate procedure di elaborazione dati consente di minimizzare l'errore di stima e di migliorare l'affidabilità dei risultati.

La quantificazione e il controllo dell'accuratezza delle stime dei parametri modali sono fondamentali per numerose applicazioni e, in particolare, per l'identificazione del danno. Numerosi studi hanno dimostrato come le stime prodotte da metodi parametrici siano di gran lunga più accurate rispetto a quelle fornite da metodi non parametrici (Reynders et al., 2012; Peeters & De Roeck, 2001). Tuttavia, a causa delle difficoltà legate alla previsione dell'ordine del modello che meglio interpola i dati sperimentali e più accuratamente caratterizza il comportamento dinamico della struttura, nelle pratiche applicazioni viene comunemente adottato un approccio conservativo. Esso si basa sulla sovrastima dell'ordine del modello, che viene definito in maniera tale da assicurare l'identificazione di tutti i modi fisici nell'intervallo di frequenze investigato. L'entità della sovrastima dipende dalle caratteristiche dei dati analizzati. In ogni caso, essa introduce poli spuri che devono essere opportunamente identificati e separati da

quelli fisici. Ciò rende la stima delle proprietà dinamiche mediante tecniche di tipo parametrico particolarmente complessa.

La distinzione dei poli fisici da quelli spuri è solitamente effettuata con l'ausilio del diagramma di stabilizzazione, che mostra i poli ottenuti per differenti ordini del modello in funzione della frequenza naturale corrispondente. Analizzando l'evoluzione dei poli per crescenti ordini del modello, i modi fisici possono essere identificati come allineamenti di poli stabili, in quanto i poli spuri tendono ad essere caratterizzati da una maggiore variabilità e tipicamente non si stabilizzano. Gli allineamenti di poli stabili, tuttavia, possono iniziare per valori maggiori o minori dell'ordine del modello a seconda del livello di eccitazione del modo considerato.

L'interpretazione automatica dei diagrammi di stabilizzazione è abbastanza complessa. Infatti, per un dato algoritmo di identificazione, la qualità del diagramma di stabilizzazione dipende da diversi parametri e soglie la cui impostazione varia da dataset a dataset. Tale circostanza evidenzia il ruolo primario del giudizio esperto nell'analisi dei dati e le conseguenti difficoltà di automazione. Numerose ricerche sono state condotte con l'obiettivo di automatizzare il processo di interpretazione dei diagrammi di stabilizzazione. Sfortunatamente, molti di questi approcci si basano sulla definizione mediante calibrazione preliminare di soglie e parametri di analisi (Magalhaes et al., 2009). La calibrazione preliminare, infatti, può rivelarsi inadeguata a monitorare le naturali variazioni dei parametri modali indotte dal danno o da fattori ambientali. Alcuni autori, pertanto, hanno preferito

concentrare i loro sforzi sui metodi che consentono di ottenere il massimo di informazione da un dato diagramma di stabilizzazione piuttosto che ottimizzarne la qualità mediante un'opportuna impostazione dei parametri di analisi (Reynders et al., 2012). Tuttavia, ciò determina approcci solitamente abbastanza complessi che richiedono la valutazione di un gran numero di parametri aggiuntivi e l'applicazione di diversi criteri di validazione.

Poiché i poli in un diagramma di stabilizzazione sono etichettati come fisici se mostrano simili proprietà, l'uso di strategie di analisi basate su tecniche di clustering (Reynders et al., 2012; Verboven et al., 2002) probabilmente rappresenta l'opzione più naturale per l'identificazione automatica dei poli fisici. Le tecniche di clustering, infatti, raggruppano i dati sulla base delle loro caratteristiche. Tali tecniche possono essere classificate nelle due grandi categorie dei metodi gerarchici agglomerativi e dei metodi partitivi. I primi procedono considerando ogni oggetto come un cluster e successivamente li aggregano in cluster via via più grandi sulla base di una data misura di distanza. L'insieme finale dei cluster risultanti dipende dalla regola definita per interrompere l'albero gerarchico a un certo livello. La necessità di impostare tale soglia rappresenta una delle principali controindicazioni all'impiego del clustering gerarchico per l'automazione delle procedure di identificazione dinamica output-only. I metodi partitivi, invece, dividono l'insieme degli oggetti in un assegnato numero di cluster. Ciascun cluster è caratterizzato dal proprio centroide. Gli oggetti sono assegnati ai cluster sulla base di un

algoritmo iterativo che minimizza la distanza tra gli oggetti appartenenti a uno stesso cluster e massimizza quella tra gli oggetti appartenenti a cluster differenti. L'algoritmo K-means, che produce oggetti mutuamente esclusivi, e quello C-means, che produce cluster parzialmente sovrapposti, sono esempi di tecniche appartenenti a questa classe. Anche l'impiego di questi algoritmi per l'automazione delle tecniche di identificazione dinamica output-only presenta degli svantaggi. Infatti, il numero di cluster è definito dall'utente; inoltre, un'intelligente applicazione delle tecniche è necessaria per evitare soluzioni sub-ottimali [16].

4.4.1 L'algoritmo per l'identificazione dinamica automatica

L'algoritmo di identificazione dinamica automatica considerato, denominato nel seguito ARES (Automated modal paRameter Extraction System) per brevità, è un algoritmo ibrido in quanto combina step di analisi relativi a differenti metodi di identificazione dinamica output-only.

L'algoritmo (Figura 4.1) può essere sintetizzato come segue. Le funzioni di auto e cross-correlazione sono calcolate a differenti ritardi e organizzate in matrici. Si procede, quindi, a una normalizzazione dei dati e all'applicazione di una procedura di Joint Approximate Diagonalization delle matrici di correlazione a differenti ritardi. La diagonalizzazione congiunta si basa su un algoritmo numerico (Cardoso & Souloumiac, 1996) e consente di stimare le funzioni di correlazione $R_{qq}(\tau_k)$ ($q=1, \dots, N_m$) di $N_m=l$ risposte modali alle

vibrazioni random (Rainieri, 2014). L'algoritmo richiede la definizione del numero p di matrici da diagonalizzare e della soglia t per l'interruzione della procedura di diagonalizzazione.

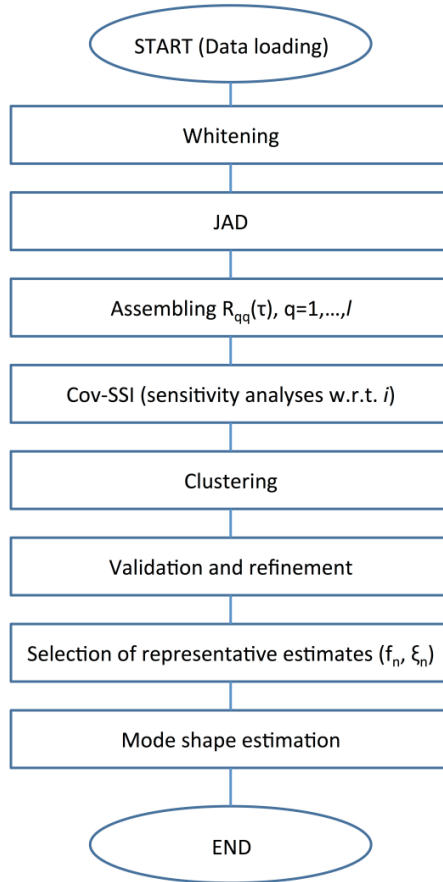


Figura 4.1 - Flowchart di ARES (Rainieri & Fabbrocino, 2010).

Capitolo 4 - Caratterizzazione del danno

Nella pratica, il numero di modi da identificare non è noto a priori. Se il numero di funzioni di correlazione l è maggiore del numero di modi, alcune funzioni non conterranno informazioni fisiche ma solo rumore. In caso contrario, alcuni modi non potranno essere identificati, a meno di reiterare l'applicazione della procedura a differenti e più ristretti intervalli di frequenza. Nella pratica, la situazione è resa ancor più complessa dal fatto che, in funzione del rapporto segnale-rumore (SNR) e della disposizione dei sensori (Rainieri, 2014), le funzioni di correlazione ottenute possono essere caratterizzate dal contributo di un unico modo, o dalla presenza di un modo dominante a cui si sovrappongono contributi di altri modi o rumore, o ancora dalla presenza di solo rumore.

Le funzioni di correlazione $R_{qq}(\tau_k)$ sono singolarmente analizzate mediante Covariance Driven Stochastic Subspace Identification (Cov-SSI) (Peeters, 2000; Rainieri & Fabbrocino, 2014) per la stima di frequenze naturali e rapporti di smorzamento. Il processo di stima richiede la definizione di due parametri: il numero di ritardi i considerati nella costruzione della matrice di Toeplitz delle correlazioni, e il massimo ordine del modello n_{\max} considerato nella costruzione del diagramma di stabilizzazione. Poiché, per un dato valore di n_{\max} , la qualità del diagramma di stabilizzazione inizialmente migliora e successivamente peggiora all'aumentare di i , è possibile identificare il valore di i che minimizza la variabilità delle stime

ottenute a differenti ordini del modello mediante un'analisi di sensibilità.

Per ciascun valore di i e ciascuna funzione di autocorrelazione, l'applicazione ripetuta di Cov-SSI fornisce un insieme di poli. L'applicazione di tecniche di clustering gerarchico consente la separazione dei poli fisici da quelli spuri. La soglia è automaticamente impostata sulla base delle dimensioni del dendrogramma, e il cluster caratterizzato dal maggior numero di elementi viene selezionato come rappresentativo di un possibile modo. In questo modo è possibile associare a ciascun valore di i e a ciascuna funzione di correlazione le relative stime di frequenza naturale e rapporto di smorzamento. In particolare, si associa a ciascun valore di i il valore medio e la deviazione standard delle stime raggruppate nel cluster selezionato.

Una volta che un insieme di possibili modi è stato identificato, si applicano opportuni criteri di validazione per eliminare eventuali stime non fisiche, quali quelle associate a funzioni di correlazione che non contengono informazioni modali. Poiché nelle condizioni operative le strutture sono strettamente stabili, un primo controllo riguarda il segno dello smorzamento, che deve essere positivo. Inoltre, poiché strutture molto smorzate si incontrano raramente nella pratica, è possibile definire un limite superiore per le stime di smorzamento, ad esempio 10%.

Inoltre, poiché i poli fisici sono caratterizzati da minore variabilità (10-100 volte più piccola) rispetto a quelli spuri, l'adozione di un limite del 10% per il coefficiente di variazione delle stime dei parametri modali

contenute nel cluster selezionato consente di eliminare cluster contenenti poli non fisici.

Dopo la fase di validazione, l'algoritmo K-means con $K=2$ è applicato per raffinare ulteriormente le stime. Le stime definitive di frequenza naturale e rapporto di smorzamento per ciascun modo saranno quelle caratterizzate dalla minima varianza al variare di i .

Le forme modali sono stimate mediante decomposizione ai valori singolari delle matrici di densità spettrale di potenza calcolate a valori di frequenza corrispondenti alle frequenze naturali precedentemente stimate.

A causa dei limiti sul numero di modi identificabili in un dato intervallo di frequenze, ARES può essere classificato come metodo "low-order" per l'identificazione automatica dei parametri modali.

Test di affidabilità sono stati condotti e riportati in Rainieri & Fabbrocino (2015) evidenziando come l'algoritmo ARES ben si presta alla determinazione automatica dei parametri modali delle strutture a partire da misure di vibrazione ambientale e, quindi, indispensabile per l'attuazione di strategie di monitoraggio.

4.5 MODELLI DELLE SERIE TEMPORALI E ANALISI DEGLI OUTLIERS

Come già discusso in precedenza, la corretta individuazione di indici sensibili al danno è fondamentale per attuare strategie di monitoraggio. Spesso, tali indici, come i parametri dinamici di una

struttura, risultano sono molto influenzati da fattori ambientali (temperatura, vento, umidità) e da fattori operativi, come il numero di fruitori di una struttura aperta al pubblico. Pertanto è fondamentale rimuovere l'influenza di tali fattori, in modo da poter valutare fenomeni di danneggiamento.

Un possibile approccio per eliminare gli effetti di fattori ambientali e operativi su frequenze naturali e forme modali consiste nella creazione di modelli in grado di rappresentare i fenomeni fisici che sono alla base di tali variazioni. In particolare, è possibile ricorrere a modelli che, a partire dalla misurazione di fattori ambientali e operativi, individuino una correlazione tra questi e le variazioni delle frequenze naturali della struttura. Tuttavia, poiché la selezione di questi fattori non è sempre agevole, è possibile seguire un altro approccio, basato su strumenti statistici che consentono la correzione delle frequenze naturali senza la necessità di misurare fattori ambientali e operativi.

4.5.1 Metodi basati sulla misura dei fattori ambientali e operativi

Un semplice metodo per stabilire la relazione tra i fattori ambientali ed operativi con le frequenze di vibrazione è la Regressione Lineare Multipla. Si tratta di un metodo statistico che è utilizzato per analizzare la relazione tra una singola variabile dipendente (le frequenze) e diverse variabili indipendenti (variabili predittive), come la temperatura. La relazione stabilita, ossia il modello, può essere utile in una fase iniziale per comprendere l'influenza di ogni predittore (input del modello) sulle variabili dipendenti e, quindi, prevedere

valori futuri della variabile dipendente quando sono noti solamente i predittori. Nel contesto del monitoraggio strutturale, è impiegata una prima serie di dati per ottenere il modello e poi, in una seconda fase, il modello è utilizzato per determinare i valori attesi delle frequenze naturali tenendo conto delle variabili indipendenti misurate. Le frequenze naturali così determinate vengono poi successivamente confrontate con i valori stimati a partire dalle serie temporali delle accelerazioni.

Il modello di regressione lineare è caratterizzato dalla seguente equazione:

$$y = Z \cdot \beta + \varepsilon \quad [4.11]$$

dove y è un vettore colonna $n \times 1$ con n osservazioni (y_k) della variabile dipendente (y), Z è una matrice $n \times p$ che contiene n valori della variabile indipendente scelta, β è un vettore $p \times 1$ che determina il peso di ogni variabile indipendente e ε è un vettore $n \times 1$ che contiene i valori di errore. Quest'ultimo termine ha le seguenti proprietà:

$$E[\varepsilon] = 0 \quad [4.12]$$

$$Cov[\varepsilon] = E[\varepsilon \varepsilon^T] = \sigma_\varepsilon^2 I$$

dove E rappresenta il valore atteso e I la matrice identità $n \times n$. Le equazioni indicano che la media dell'errore viene assunta pari a zero, gli errori sono indipendenti e che la loro varianza è costante.

Il primo step dell'analisi di regressione lineare è la selezione delle variabili indipendenti che contribuiscono alla variazione delle variabili dipendenti osservate. Generalmente, una variabile indipendente che influenza maggiormente i parametri modali della struttura è la temperatura. In una prima fase di applicazione del metodo, deve essere selezionato un insieme di predittori con elevate correlazioni con le variabili dipendenti. La correlazione tra due variabili x e y , con n osservazioni x_k e y_k , è definita come:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2}}, \text{ con } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k; \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k; \quad [4.13]$$

Tale indice varia tra -1 e 1. Valori assoluti prossimi all'unità indicano un'alta correlazione lineare tra le due variabili considerate. Il principale obiettivo dell'analisi di regressione lineare è la stima dei parametri che forniscono una buona corrispondenza tra le osservazioni e le variabili indipendenti del modello. Questi sono solitamente ottenuti tramite il metodo dei minimi quadrati, che minimizza la somma dei quadrati degli errori. Seguendo tale approccio, le stime dei parametri del modello sono date dall'equazione:

$$\hat{\beta} = (Z^T Z)^{-1} Z^T y \quad [4.14]$$

Dopo la stima dei parametri del modello, è necessario valutare la qualità del modello ottenuto: in modo particolare bisogna verificare se i predittori sono stati scelti in maniera adeguata. Un indicatore della qualità dell'interpolazione è espresso dalla seguente funzione:

$$\hat{\sigma}_{\varepsilon}^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_k^2 \quad [4.15]$$

avendo definito l'errore, detto anche residuo, come differenza tra i valori osservati della variabile dipendente (y) e quelli stimati (\hat{y}):

$$\hat{\varepsilon} = y - \hat{y} = (I - Z (Z^T Z)^{-1} Z^T) y \quad [4.16]$$

Una volta che è stato ottenuto un buon modello, è possibile calcolare le previsioni della variabile dipendente (\hat{y}_0) associati ai valori dei predittori non considerati per la costruzione del modello (z_0). Le previsioni sono ottenute dall'Equazione [4.11] trascurando il termine di errore:

$$\hat{y}_0 = z_0 \hat{\beta} \quad [4.17]$$

Nell'ambito di un progetto di monitoraggio strutturale, i modelli di regressione multipla dovrebbero essere costruiti utilizzando i dati raccolti durante almeno un anno intero con i dati di periodi estivi e invernali, in modo tale che l'influenza dei fattori ambientali sulle frequenze naturali sia ben caratterizzata.

Nell'analisi degli effetti dei fattori ambientali o operativi sulle frequenze naturali, invece di una sola variabile dipendente (output) possono essere considerate diverse variabili indipendenti, pari al numero di modi stimati. In questo caso, può applicarsi l'analisi di regressione lineare multivariata. Questa consiste nell'applicazione della procedura sopra descritta a tutte le serie temporali contemporaneamente. È possibile formulare tale problema come segue:

$$Y = Z B + E \quad [4.18]$$

dove Y è una matrice $n \times m$, Z è una matrice $n \times p$ che corrisponde a n valori dei predittori p selezionati, B è una matrice $p \times m$ che contiene i parametri dei modelli ed E è una matrice $n \times m$ che contiene gli errori associati alla modellazione.

I modelli di regressione applicati alle osservazioni che caratterizzano l'evoluzione temporale di una certa variabile possono essere classificati come statici o dinamici. I modelli statici definiscono i valori delle variabili in uscita in un determinato istante di tempo $y_k = y(t_k)$ usando solamente le osservazioni associate allo stesso istante di tempo $x_k = x(t_k)$. I modelli dinamici assumono che i valori delle variabili dipendenti in un certo istante di tempo possano anche essere influenzati da valori degli ingressi del modello a precedenti istanti di tempo. L'adozione di un modello dinamico nella caratterizzazione dell'influenza della temperatura sulle frequenze naturali è giustificata

dal fatto che si riscontrano processi dinamici di riscaldamento e raffreddamento giornalieri.

Il modello di regressione dinamica può essere ulteriormente generalizzato per effettuare previsioni considerando anche valori precedenti delle variabili dipendenti. In tal caso si adottano modelli dinamici come il modello autoregressivo con input esogeno (ARX), che comprende un'uscita autoregressiva ed una parte di input esogena. Se si considera un solo input ed un solo output, il modello è caratterizzato dalla seguente equazione:

$$y_k = -a_1 y_{k-1} - \dots - a_{p_a} y_{k-p_a} + b_1 z_{k-p_k} + b_2 z_{k-p_k-1} + \dots + b_{p_b} z_{k-p_k-p_b+1} + \varepsilon_k \quad [4.19]$$

dove y_k è il valore della variabile dipendente (output) all'istante k , z_k è il valore del predittore (input) all'istante k , a_k e b_k sono i parametri dei modelli da determinare e ε_k è l'errore del modello all'istante k . Il modello ARX è caratterizzato da tre parametri: un ordine autoregressivo p_a (numero di osservazioni precedenti della variabile in uscita considerate nel modello), l'ordine esogeno p_b (numero di valori considerati dalla variabile di ingresso) e il ritardo assoluto tra input e output p_k .

L'equazione presentata può essere facilmente adattata a considerare diverse variabili di input. Le stime dei parametri del modello possono essere ottenute con il metodo dei minimi quadrati utilizzando la stessa espressione che è stata utilizzata per il modello di regressione lineare:

$$\beta^T = [a_i (i = 1, \dots, p_a) \quad b_i (i = 1, \dots, p_b)]$$

$$\varphi_k^T = [-y_{k-1} \dots -y_{k-p_a} \quad z_{k-p_k} \dots z_{k-p_k-p_b+1}] \quad [4.20]$$

$$Z^T = [\varphi_1 \quad \varphi_2 \dots \varphi_n]$$

Dopo l'identificazione dei parametri del modello, questo può essere utilizzato per effettuare previsioni sull'andamento delle frequenze naturali al variare dei fattori ambientali e operativi considerati.

4.5.2 Rimozione degli effetti ambientali e operativi in assenza delle relative misure

Di seguito si concentra l'attenzione su una serie di metodi che eliminano gli effetti di fattori ambientali e operativi sulle proprietà modali registrate da un sistema di monitoraggio dinamico attraverso la decomposizione di matrici di covarianza calcolate dalle serie temporali delle proprietà modali registrate in un periodo di riferimento.

La Principal Component Analysis (PCA) è uno strumento utilizzato nel campo della statistica multivariata che rappresenta la varianza o la covarianza di un set di variabili attraverso una combinazione lineare di tali variabili (Johnson & Wichern 1992). Tale tecnica è comunemente usata per ridurre la dimensionalità del problema, sostituendo un gruppo di variabili correlate con un nuovo gruppo più piccolo di variabili indipendenti, che sono definite componenti principali.

Capitolo 4 - Caratterizzazione del danno

Le variabili originali, raccolte in un vettore y di m componenti possono essere trasformate in un altro set di variabili z applicando la seguente equazione:

$$z = T y \quad [4.21]$$

dove T è una matrice ortonormale $m \times m$ (la sua inversa corrisponde con la trasposta) che applica una rotazione al sistema di coordinate originario. A differenza dell'analisi di regressione, ora y rappresenta un generico campione di m variabili differenti e non i valori di una singola variabile a differenti istanti di tempo. L'obiettivo della PCA è quello di ricavare la trasformazione che, a partire da y , fornisce una serie di variabili (z , le componenti principali) aventi le seguenti proprietà:

- tutte le variabili sono indipendenti tra loro, per cui la matrice di covarianza di z è diagonale;
- la varianza delle variabili z_1, \dots, z_m diminuisce da z_1 a z_m .

In questo modo la prima componente principale (z_1) illustra la parte più cospicua della varianza delle variabili originali, mentre le ultime componenti di z presentano varianze inferiori e quindi alcune di esse possono essere trascurate in quanto non sono rilevanti per spiegare la variabilità delle variabili originali.

Con la PCA la trasformazione delle variabili originarie $\{y\}$ nel nuovo set $\{z\}$ avviene mediante la seguente equazione:

$$\{z\} = [T] \{y\} \quad [4.22]$$

Come nel caso dell'analisi di regressione, un'efficace compensazione degli effetti delle variabili ambientali e operative richiede la raccolta di dati per un periodo di tempo sufficientemente lungo, associato a una condizione di struttura sana, in modo tale che le serie temporali contengano l'informazione relativa all'intero range di variabilità delle variabili ambientali e operative. La PCA mette in evidenza l'effetto di fattori rilevanti, quali la temperatura, e riduce la dimensionalità del modello eliminando gli effetti secondari, quali, ad esempio, quelli dovuti a errori random nella stima delle frequenze naturali. La differenza (residuo) tra i valori osservati e quelli ri-mappati attraverso la PCA è solitamente impiegata come indice di danno. Infatti, essa non risulta più influenzata dalle variabili ambientali e operative, il cui effetto è modellato dalle componenti principali considerate.

4.5.3 Control Chart

Dopo aver ottenuto caratteristiche che sono insensibili a fattori ambientali ed operativi, deve essere utilizzata una procedura per monitorare tali valori e rilevare eventuali anomalie. I control chart sono strumenti statistici che possono essere efficacemente impiegati per tale scopo. Essi sono tipicamente costituiti da un grafico che riporta i dati in funzione del tempo e linee orizzontali che definiscono i limiti di variazione in condizioni ordinarie. Pertanto, un'osservazione al di fuori di tale regione è considerata un'osservazione anomala. Nel

contesto del monitoraggio strutturale, a questa variazione è associato un fenomeno di danneggiamento.

Il control chart più semplice, adatto solo per controllare una caratteristica, è l'X-chart. In questo si riportano le singole osservazioni o la media delle osservazioni in ordine di tempo e tre linee: una linea centrale (CL) e due linee orizzontali supplementari corrispondenti ai limiti di controllo superiori e inferiori, denominati rispettivamente UCL e LCL. La linea centrale è posizionata in corrispondenza della media di tutte le osservazioni, indicata con \bar{x} . I limiti di controllo sono dati da:

$$\begin{aligned} UCL &= \bar{x} + 3\sigma \\ LCL &= \bar{x} - 3\sigma \end{aligned} \quad [4.23]$$

dove σ è la deviazione standard del campione. In presenza di una distribuzione normale, moltiplicare per 3 la deviazione standard equivale a considerare un intervallo di confidenza del 99.7%.

Quando il control chart è integrato in un sistema di monitoraggio dinamico, x indica un'osservazione generica di una caratteristica unidimensionale insensibile agli effetti operativi e ambientali, che può essere, ad esempio, la norma euclidea dei residui ottenuta dopo l'applicazione della PCA. Tuttavia, è possibile applicare i control chart anche in presenza di dati multivariati.

CAPITOLO 5

PROPOSTA

METODOLOGICA E

RISULTATI APPLICATIVI

Nell'ottica dell'implementazione di una SHF in quest'ultimo capitolo sarà descritto il sistema di monitoraggio per la sola componente strutturale di una struttura ospedaliera individuata e ne saranno analizzati e discussi i risultati. Se per la componente strutturale è stato progettato ed installato un sistema di monitoraggio basato sulle vibrazioni, per quanto riguarda i componenti non strutturali sono state eseguite prove sperimentali per la loro caratterizzazione dinamica al fine di valutare fenomeni di interazione struttura-componente e stabilire possibili strategie di monitoraggio. Attualmente, prove su componenti sono state eseguite da Cosenza et al. (2014), Magliulo et al. (2012), Chen et al. (2012) e Mosqueda et al. (2009) mediante l'ausilio di tavole vibranti, consentendo la costruzione di curve di fragilità.

I componenti oggetto di sperimentazione sono stati un dispenser per i medicinali ed un serbatoio per lo stoccaggio di liquidi in pressione atmosferica. Tali componenti sono classificabili come sensibili alle accelerazioni e ciò giustifica l'approccio basato sulla loro caratterizzazione dinamica.

5.1 MONITORAGGIO STRUTTURALE OSPEDALE "A. CARDARELLI" DI CAMPOBASSO

La struttura individuata per l'installazione del sistema di monitoraggio della componente strutturale è il Presidio Ospedaliero "A. Cardarelli" di Campobasso (Figura 5.1), l'ospedale principale della regione, grazie alla convenzione di studio e ricerca tra l'Università del Molise e l'Azienda Sanitaria Regionale Molise sulla sicurezza delle strutture sanitarie e sulle tecniche di monitoraggio strutturale per la riduzione del rischio sismico.

L'intero impianto strutturale può essere diviso in due parti:

- 1) la piastra, nella quale trovano ubicazione gli impianti, i reparti di radiologia e medicina nucleare, gli uffici sanitari ed amministrativi, gli ambulatori, è costituita da un corpo di fabbrica basso ed esteso che, per semplicità, seguendo le giunzioni, è stato suddiviso in due corpi B e C e le rispettive sottodivisioni (B1, B2, B3, C, C1 e C2);
- 2) le degenze sono costituite dai corpi di fabbrica III, IV, V e VI, raggiungendo i dieci ordini di altezza.



Figura 5.1 - Vista dall'alto del P. O. "A. Cardarelli" di Campobasso.

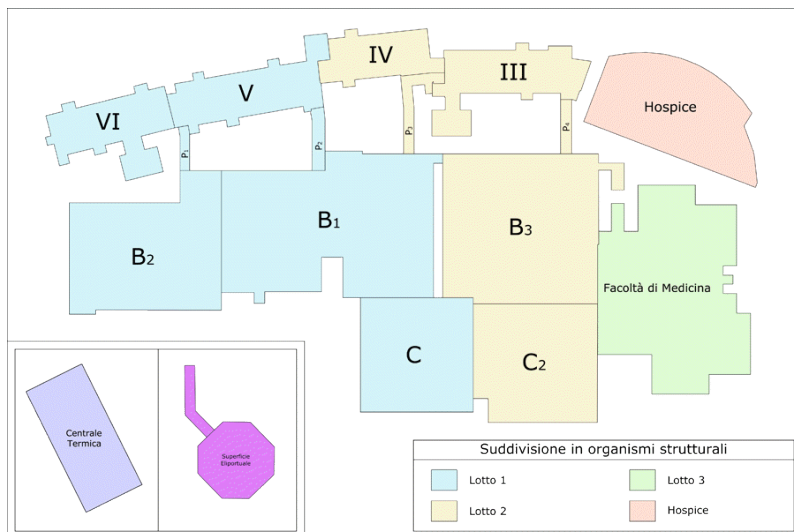


Figura 5.2 - Suddivisione in organismi strutturali (Gallina et al., 2010).



Figura 5.3 - P.O. "A. Cardarelli"; blocchi V e VI.

Dall'analisi dei documenti acquisiti è emersa con chiarezza la successione temporale delle opere e le caratteristiche strutturali degli organismi edilizi. Il Polo Ospedaliero è stato realizzato in lotti successivi, a partire dal 1968.

I primi due lotti che comprendono la quasi totalità del Polo Ospedaliero (le degenze, la piastra dei servizi e la centrale tecnologica) sono stati realizzati prima della classificazione sismica del sito di impianto, subentrata con D.M. LL.PP. 7 MARZO 1981.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

Successivamente sono stati realizzati il parcheggio eliporto, il terzo lotto, oggi destinato a sede universitaria, ed è attualmente in costruzione un edificio adibito ad Hospice.

Lo studio della struttura per l'installazione del sistema di monitoraggio è avvenuto individuando i giunti tecnici installati e la conseguente suddivisione del complesso ospedaliero in organismi strutturali indipendenti fra loro e giuntati. Sono stati così individuati 14 corpi di fabbrica (Figura 5.2) aventi differenti caratteristiche funzionali.

Vista l'impossibilità di monitorare tutti i corpi di fabbrica è stata focalizzata l'attenzione ai blocchi V e VI (Figura 5.3), dove, ai primi due livelli seminterrati trovano ubicazione la lavanderia, l'obitorio e la mensa, mentre i restanti piani sono destinati alle degenze.

I due blocchi, di n. 8 piani fuori terra e due seminterrati, ricoprono un'area complessiva di circa 80 x 13.5 m. Il blocco V lungo 36 m ed il corpo VI lungo 42 m hanno un'altezza complessiva di 33 m. Essi sono costituiti da telai piani in c.a. disposti in direzione longitudinale, solai in latero-cemento di spessore 40 cm, travi esclusivamente in spessore, pilastri caratterizzati da significative rastremazioni dal basso verso l'alto e fondazioni su pali. Le pareti perimetrali sono costituite da lastre prefabbricate in cemento alleggerito dello spessore di 14 cm con ciottoli sulla superficie esterna.

I due blocchi, oggetto di attenzione, sono tra loro separati da un giunto strutturale di ridotte dimensioni. La Figura 5.4 mostra le dimensioni del giunto al livello della copertura. Giunti delle stesse dimensioni

separano i blocchi V e VI dalle restanti strutture del complesso ospedaliero.



Figura 5.4 - Giunto strutturale tra i blocchi V e VI.

5.1.1 Progettazione ed installazione del sistema di monitoraggio strutturale

Nel paragrafo 3.3 è stato affrontato il problema della progettazione di un sistema di monitoraggio per complessi ospedalieri, individuando cinque step (*Accuracy, Budget compliance, Computational burden, Durability, Ease of use*) da tenere in considerazione per una corretta progettazione. Questi non sono consequenziali, ma definiscono gli aspetti da considerare per una valida progettazione. Seguendo queste indicazioni si descrive di seguito la progettazione e l'installazione del

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

sistema di monitoraggio per la componente strutturale del Presidio Ospedaliero "A. Cardarelli".

Lo scopo del sistema di monitoraggio per la componente strutturale è quello di individuare possibili stati di danneggiamento durante il corso della vita della struttura ed a seguito di un evento sismico. Come ampiamente discusso nei capitoli precedenti, un sistema di monitoraggio basato sulle vibrazioni può fornire informazioni sullo stato di salute della componente strutturale. Quindi, monitorando le variazioni dei parametri dinamici della struttura in termini di frequenze e forme modali è possibile valutare l'insorgenza di stati di danneggiamento. Lo scopo, dunque, è monitorare l'evoluzione di tali parametri dinamici nel tempo, in maniera continua e non solo durante un evento sismico. Per fare ciò è necessario utilizzare sensori accelerometrici ad elevata sensibilità in grado di valutare la risposta della struttura in condizione, principalmente, di rumore ambientale (*Accuracy*). Per assolvere tale funzione sono stati selezionati ed utilizzati accelerometri monodirezionali force-balance che offrono la possibilità di selezionare sensibilità e del fondoscala. Il modello utilizzato è l'Episensor FBA ES-U2 della kinematics con sensibilità e fondoscala variabili, rispettivamente, da 2.5 V/g a 40 V/g e ± 0.25 g e ± 4 g. Impostando valori di sensibilità elevati si ha una riduzione della massima accelerazione registrabile, ad esempio con valore di sensibilità elevata di 40 V/g si ha un fondoscala di ± 0.25 g che risulta limitante per registrare un input sismico. Per tale motivo è stato impostato un valore di sensibilità di 10V/g e fondoscala di ± 0.5 g in

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

modo da avere un'adeguata sensibilità per le misure in condizioni di rumore ambientale ed un adeguato range per registrare un sisma.



Figura 5.5 - Accelerometri force-balance kinemetrics ES-U2.

Tale tipo di accelerometro ben si presta al monitoraggio di componenti non strutturali in quanto presenta un range in frequenza tra 0 e 250 Hz idoneo ad individuare le basse frequenze dei modi strutturali globali.

La scelta della tipologia dell'accelerometro utilizzato è dipesa anche da questioni economiche, in quanto, non avendo un *Budget* da consentire l'acquisto di nuovi strumenti di misura sono stati scelti i sensori maggiormente idonei tra quelli a disposizione del Laboratorio di Dinamica Strutturale e Geotecnica (StreGa) dell'Università degli Studi del Molise. L'architettura del sistema di monitoraggio è stata completata utilizzando una centralina di acquisizione Trioguard a 16 bit.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

Per consentire la corretta determinazione dei parametri dinamici della struttura, quali frequenze, smorzamenti e forme modali è necessario dislocare i sensori in maniera distribuita sulla struttura in modo tale da poter identificare forme modali flessionali in entrambe le direzioni e modi torsionali. Un aspetto che bisogna tenere in considerazione è la presenza del giunto strutturale che separa i due blocchi delle degenze (blocco V e VI). Quindi, con lo scopo di identificare adeguatamente le forme modali e valutare l'efficacia del giunto strutturale, è necessario predisporre coppie di due sensori ortogonali tra loro nei due vertici opposti di ogni blocco strutturale. In una condizione ideale il posizionamento dei sensori nel piano deve essere effettuato in vertici opposti e replicando la configurazione in diversi impalcati lungo lo sviluppo in elevazione della struttura.

Avendo a disposizione un numero massimo di 16 accelerometri (*Budget compliance*) questi sono stati installati su due impalcati per ciascun blocco strutturale. Nello specifico, sono stati strumentati gli ultimi due impalcati. La scelta di focalizzare l'attenzione agli ultimi due impalcati è dovuta ad esigenze funzionali del P.O. in quanto i piani inferiori presentano difficoltà nell'installazione dei sensori a seguito di un elevato numero di degenze.

Avendo in considerazione quanto esposto fin'ora relativamente ai limiti funzionali e di budget, un primo layout per l'esecuzione di una prova dinamica preliminare volta a valutarne l'efficacia è riportato in Figura 5.6. I risultati della prova dinamica saranno riportati nel paragrafo 5.1.1.1.



Figura 5.6 - Layout sistema di monitoraggio: quinto (a) e sesto piano (b).

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

Il layout adottato, anche se non rappresenta un'ideale configurazione, consente di identificare i modi principali della struttura, anche mediante il software di elaborazione automatica dei dati ARES.

Altro aspetto da valutare nella progettazione di un sistema di monitoraggio è l'onere computazionale per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati (*Computational Burden*). Ad esempio, sistemi di monitoraggio che si basano sulle serie temporali di eventi sismici per l'identificazione del danno, non necessitano un salvataggio continuo dei dati, ma solamente in caso di evento sismico definendo a priori una soglia di trigger. Mentre, per il monitoraggio della componente strutturale in condizioni operative, è necessaria l'acquisizione ed il salvataggio dei dati in maniera continua 24h su 24h. Ciò comporta la gestione di un flusso di dati elevato. Essendo un sistema volto ad identificare i modi globali della struttura non sono necessarie elevate frequenze di campionamento. Risulta, quindi, fondamentale definire adeguatamente la frequenza di campionamento in modo da non avere un numero di campioni eccessivo e soprattutto consente di ridurre l'onere computazionale per l'estrazione dei parametri dinamici. L'algoritmo per l'identificazione automatica dei parametri dinamici (ARES), essendo basato su tecniche di identificazione output-only, necessita di lunghe serie temporali per la corretta identificazione, ciò a discapito di un onere computazionale maggiore.

Per il sistema in questione è stata impostata una frequenza di campionamento di 100 Hz per l'acquisizione ed il salvataggio dei dati.

Mentre la loro elaborazione, a mezzo dell'algoritmo ARES, è effettuata

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

su serie temporali della durata di 30 minuti, ottenendo, così, due stime dei parametri dinamici ogni ora. Per migliorare l'accuratezza e la stabilità delle stime è impostata una doppia elaborazione con differenti parametri di filtraggio e decimazione dati. Una prima analisi provvede all'applicazione di un filtro passa-banda Butterworth di ordine 6 tra 0.2 e 3 Hz e decimazione ad una frequenza di 10 Hz, mentre una seconda elaborazione avviene impostando un filtraggio tra 2.5 e 8 Hz ed una decimazione a 20 Hz. Il motivo della doppia elaborazione dei dati con filtri e fattori di decimazione differenti dipende dal fatto che l'algoritmo ARES, per via del layout, non riesce a separare le sorgenti con i modi superiori che, quindi, vengono scartati dall'analisi.



Figura 5.7 - Installazione dei sensori.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

Grande attenzione è stata posta nell'installazione del sistema di monitoraggio al fine di assicurarne la durabilità (*Durability*). I sensori, installati secondo il layout in Figura 5.6, sono stati inglobati in box di protezione (Figura 5.7) per evitarne il danneggiamento. Il passaggio dei cavi è avvenuto in apposite canaline. Al fine di evitare interazioni con altre apparecchiature elettriche presenti all'interno di controsoffittature, la movimentazione in orizzontale dei cavi è avvenuta al livello del sottotetto, mentre l'attraversamento in direzione verticale è avvenuto in corrispondenza di ciascuna coppia di sensori installata. Una canalina flessibile (Figura 5.8) è stata utilizzata per l'attraversamento dei cavi in corrispondenza del giunto in modo da consentire eventuali movimenti differenziali dei due blocchi strutturali in caso di sisma, senza provocarne il tranciamento.



Figura 5.8 - Attraversamento dei cavi in corrispondenza del giunto strutturale.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

Al fine di consentire il funzionamento del sistema di monitoraggio anche in assenza di corrente elettrica, è stato installato un gruppo di continuità.

Il sistema di acquisizione ed elaborazione dati è stato collocato in un locale adibito a tale scopo ed ubicato all'ultimo impalcato della struttura. Il sistema raffigurato in Figura 5.9 provvede ad acquisire ed elaborare i dati in maniera automatica e provvede a segnalare malfunzionamenti del sistema e possibili stati di danneggiamento (*Ease of use*).



Figura 5.9 - Hardware di acquisizione ed elaborazione dati.

5.1.1.1 *Identificazione dinamica preliminare*

Prima dell'installazione definitiva del sistema di monitoraggio è stata condotta una prova dinamica preliminare con lo scopo di valutare l'efficacia del layout adottato.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

È stata registrata la risposta della struttura alle vibrazioni ambientali, per la durata di diverse ore, mediante i sensori accelerometrici descritti in precedenza e posizionati come da layout in Figura 5.6, e centralina di acquisizione Trioguar a 16 bit.

Al fine di ottenere misure di qualità ed evitare disturbi nei segnali, particolare attenzione è stata condotta nell'attraversamento dei cavi dai sensori alla centralina di acquisizione.

I dati acquisiti, dopo una prima fase di filtraggio e decimazione, sono stati elaborati con metodi OMA output-only operanti nel dominio delle frequenze, Frequency Domain Decomposition (FDD), e del tempo, Covariance Driven Stochastic Subspace Identification (Cov-SSI). Una breve descrizione dei metodi di analisi è riportata nel paragrafo 5.2.1.

Dopo una prima ispezione dei dati finalizzata a valutare la qualità delle registrazioni eseguite, ciascuna registrazione è stata filtrata mediante applicazione di un filtro passabanda di tipo Butterworth con ordine 6 nel range 0.2-10 Hz. Successivamente, le serie temporali sono state decimate in modo da ottenere una frequenza di campionamento finale di 20 Hz. Il filtraggio, eseguito prima della decimazione, garantisce l'assenza di problemi di aliasing nell'intervallo di frequenze di interesse.

L'elaborazione dei dati mediante metodi nel dominio della frequenza è stata effettuata calcolando gli spettri mediante l'uso della finestra di Hanning, con un overlap del 66%. La durata delle registrazioni è sufficiente ad assicurare un elevato numero di medie e, quindi, un

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

errore random contenuto nella stima della matrice delle densità spettrali di potenza. La risoluzione in frequenza adottata nel calcolo degli spettri risulta pari a 0.01 Hz, minimizzando così il bias nella stima delle densità spettrali di potenza. Un plot dei valori singolari è riportato in Figura 5.10.

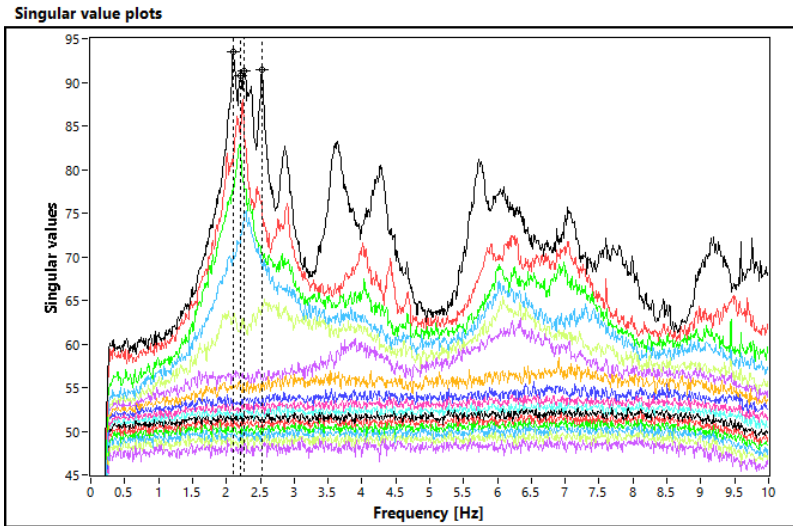


Figura 5.10 - Diagramma valori singolari.

Per quanto riguarda l'elaborazione dei dati mediante metodi parametrici nel dominio del tempo, il numero di block-righe è stato impostato a valle di un'analisi di sensibilità finalizzata ad ottimizzare la qualità del diagramma di stabilizzazione. Esso è stato costruito per valori dell'ordine del modello non superiori a 70 con un numero di block-righe di 30 (Figura 5.11).

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

L'analisi dei dati e il confronto tra i risultati forniti dai vari metodi (FDD e Cov-SSI) ha consentito l'identificazione e la validazione dei modi fondamentali della struttura. I dati sono stati altresì elaborati mediante l'algoritmo di elaborazione automatica dei dati (ARES) per valutarne l'efficacia. I risultati ottenuti con l'ausilio di ARES sono i medesimi di quelli ottenuti con le altre tecniche di identificazione dinamica output-only.

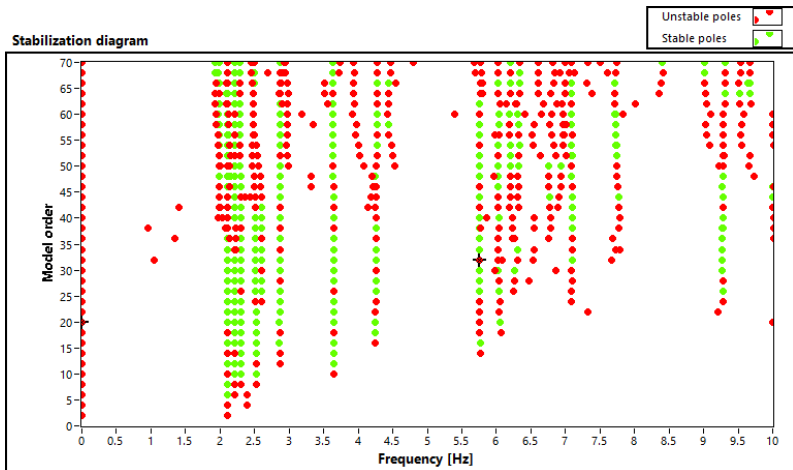


Figura 5.11 - Diagramma di stabilizzazione.

In Tabella 5.1 si riportano i valori delle frequenze naturali e i rapporti di smorzamento dei primi quattro modi fondamentali identificati, che possono essere classificati come segue:

- 1) Flessionale globale in direzione longitudinale;
- 2) Flessionale globale in direzione trasversale;
- 3) Torsionale globale;

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

4) Torsionale disaccoppiato.

| # modo | f [Hz] | ξ [%] |
|--------|--------|-----------|
| 1 | 2.11 | 1.66 |
| 2 | 2.22 | 1.73 |
| 3 | 2.28 | 1.77 |
| 4 | 2.53 | 1.08 |

Tabella 5.1 - Risultati dell'identificazione: frequenze naturali e rapporti di smorzamento.

Gli spostamenti modali per i modi identificati sono dettagliati in

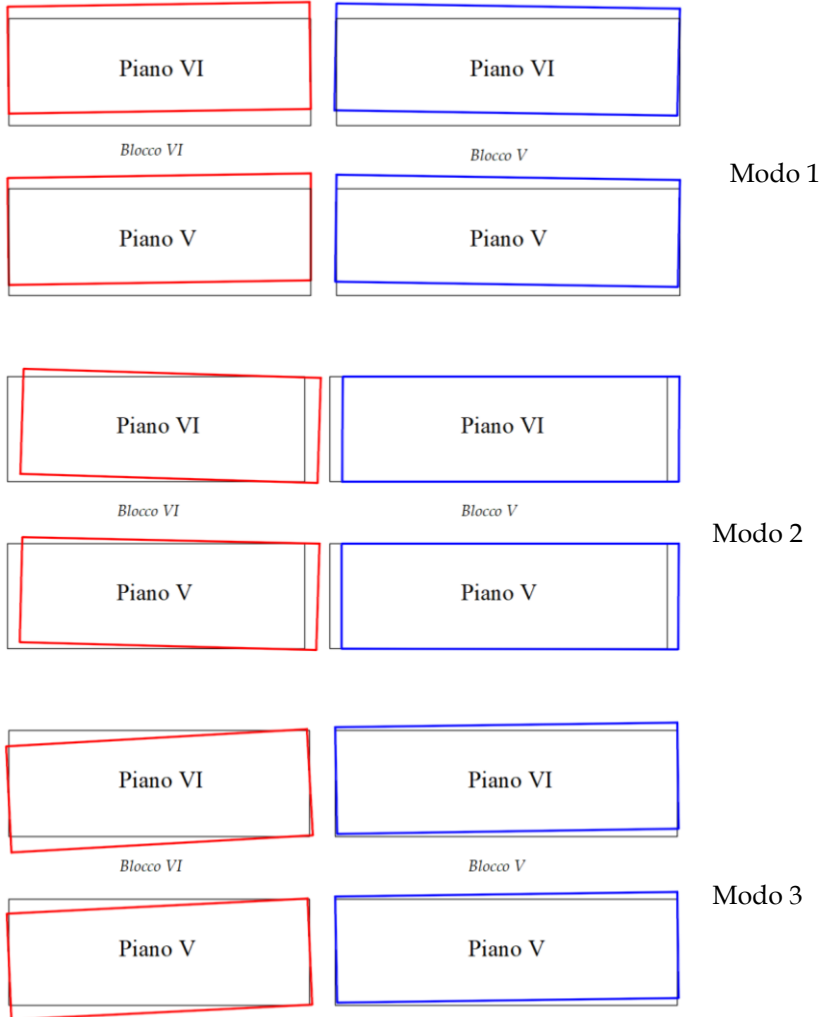
Tabella 5.2.

| Canali | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 | Modo 4 |
|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | 2.11 Hz | 2.22 Hz | 2.28 Hz | 2.53 Hz |
| <i>Ch1</i> | -0.081 | 1.000 | 0.119 | 0.567 |
| <i>Ch2</i> | 0.498 | 0.220 | 1.000 | 1.000 |
| <i>Ch3</i> | 0.042 | 0.875 | -0.187 | -0.008 |
| <i>Ch4</i> | 0.861 | -0.122 | 0.029 | -0.805 |
| <i>Ch5</i> | -0.061 | 0.943 | 0.147 | 0.569 |
| <i>Ch6</i> | 0.450 | 0.201 | 0.907 | 0.906 |
| <i>Ch7</i> | 0.053 | 0.798 | -0.172 | -0.032 |
| <i>Ch8</i> | 0.795 | -0.136 | 0.031 | -0.747 |
| <i>Ch9</i> | 0.005 | 0.813 | 0.005 | -0.121 |
| <i>Ch10</i> | 0.802 | -0.117 | -0.140 | -0.540 |
| <i>Ch11</i> | -0.092 | 0.821 | -0.113 | 0.235 |
| <i>Ch12</i> | 0.549 | -0.011 | -0.49 | 0.452 |
| <i>Ch13</i> | 0.000 | 0.753 | 0.005 | -0.101 |
| <i>Ch14</i> | 0.753 | -0.107 | -0.047 | -0.678 |
| <i>Ch15</i> | -0.078 | 0.754 | -0.113 | 0.216 |
| <i>Ch16</i> | 1.000 | -0.022 | -0.873 | 0.808 |

Tabella 5.2 - Forme modali sperimentali.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

Una rappresentazione grafica indicativa delle forme modali è riportata in Figura 5.12.



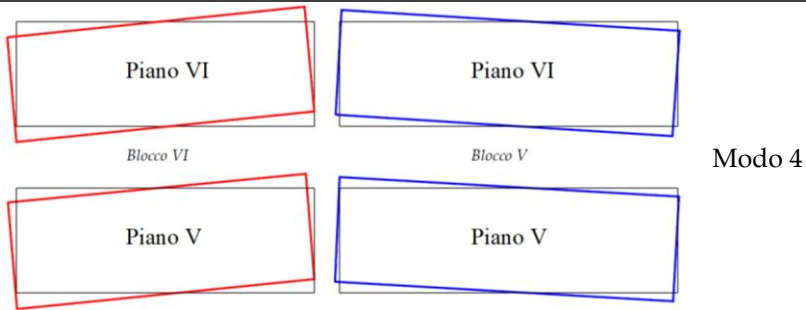


Figura 5.12 - Rappresentazione grafica delle forme modali sperimentali.

Dall'analisi dei dati, e come è possibile osservare dal grafico dei valori singolari (Figura 5.10) e dal diagramma di stabilizzazione (Figura 5.11), le frequenze di risonanza sono in numero maggiore di quelle riportate. Da queste analisi sono state selezionate solamente i primi quattro modi principali in quanto la matrice degli AUTO-MAC presentava elementi rilevanti fuori diagonale principale. Ciò è sintomo di un layout non ideale, per via delle problematiche funzionali discusse in precedenza.

| | | | |
|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0.006 | 0.010 | 0.006 |
| 0.006 | 1 | 0.003 | 0.121 |
| 0.010 | 0.003 | 1 | 0.070 |
| 0.006 | 0.121 | 0.070 | 1 |

Tabella 5.3 - Matrice degli AUTO-MAC.

Anche se le quattro frequenze naturali considerate risultano molto ravvicinate tra loro, le forme modali sono ben distinguibili e

presentano una matrice degli AUTO-MAC con valori nulli fuori diagonale principale, come dimostrato dalla Tabella 5.3.

5.1.2 Risultati del monitoraggio

Il sistema di monitoraggio per la componente strutturale sopra descritto è stato installato ed è operativo dal 24 Marzo 2016.

In questo periodo di funzionamento è stata registrata la risposta della struttura alle vibrazioni ambientali ed i dati sono stati processati in maniera automatica per mezzo dell'algoritmo ARES.

Dall'analisi modale riportata nel paragrafo 5.1.1.1 quattro sono stati i modi fondamentali considerati. Altri picchi di risonanza sono visibili dal diagramma dei valori singolari (Figura 5.10), ma non presentano stime stabili nel tempo a causa di un layout incentrato agli ultimi due impalcati e all'elevata interazione tra i blocchi strutturali, viste le dimensioni ridotte dei giunti.

Un esempio di tracking delle prime quattro frequenze di vibrazione fondamentali, relativamente al mese di Aprile 2017, è riportato in Figura 5.13. Dal grafico è ben visibile una marcata variazione di ciascuna frequenza che non è sintomo di uno stato di danneggiamento. Tale variazione ha un andamento ciclico giornaliero e si nota come durante le ore notturne si assiste ad una diminuzione delle frequenze che, invece, incrementano durante le ore diurne.

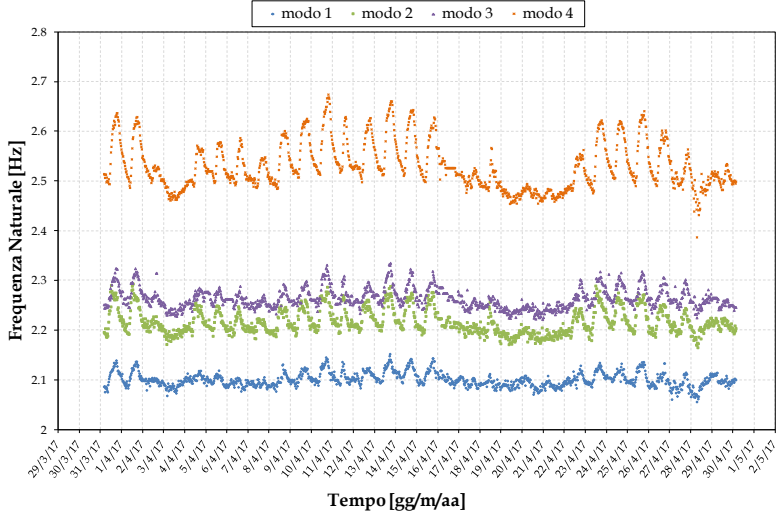


Figura 5.13 - Tracking dei principali 4 modi di vibrazione per il mese di Aprile 2017.

Tale variazione è legata principalmente a variazioni ambientali, quali la temperatura. Infatti, riportando in una finestra temporale ridotta (Figura 5.14) le frequenze stimate e i valori della temperatura registrati dalle stazioni meteo locali, è visibile un'elevata dipendenza della frequenza dalla temperatura. Nello specifico si nota come ad un incremento della temperatura, a partire dalle ore 7, corrisponde un rapido incremento delle frequenze naturali, manifestando un valore massimo alle ore 15, istante in cui si assiste ad una diminuzione delle frequenze coincidente con una diminuzione di temperatura, registrando un valore minimo alle ore 6 del mattino.

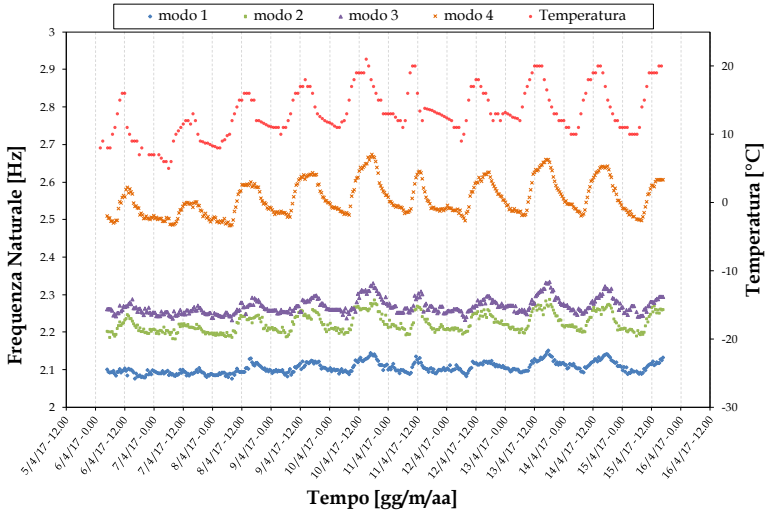


Figura 5.14 - Tracking delle frequenze naturali e della temperatura per una durata di 9 giorni.

Si capisce come tale variazione delle frequenze sia legata a fenomeni di dilatazione termica da cui è interessata la struttura. Aumentando la temperatura si ha una dilatazione dei materiali che produce un duplice effetto: i pannelli di tamponamento in cemento armato, aumentando di dimensione a causa dell'innalzamento della temperatura, riducono lo spazio con i telai in cemento armato causando, così, un effetto irrigidente; le dimensioni del giunto strutturale si riducono, creando maggiore interazione tra i corpi strutturali.

Le temperature sono registrate dalla stazione meteo di Campobasso e quindi non rappresentano la temperatura strutturale. Per tale motivo non è possibile effettuare analisi di correlazione diretta tra le frequenze stimate e le temperature.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

Quanto osservato per le variazioni delle frequenze durante l'arco della giornata non è possibile riscontrarlo nella variazione dello smorzamento. Infatti, in Figura 5.15, non si registra alcuna variazione giornaliera dello smorzamento relativo al primo modo di vibrazione, durante il singolo giorno e nel mese di Aprile.

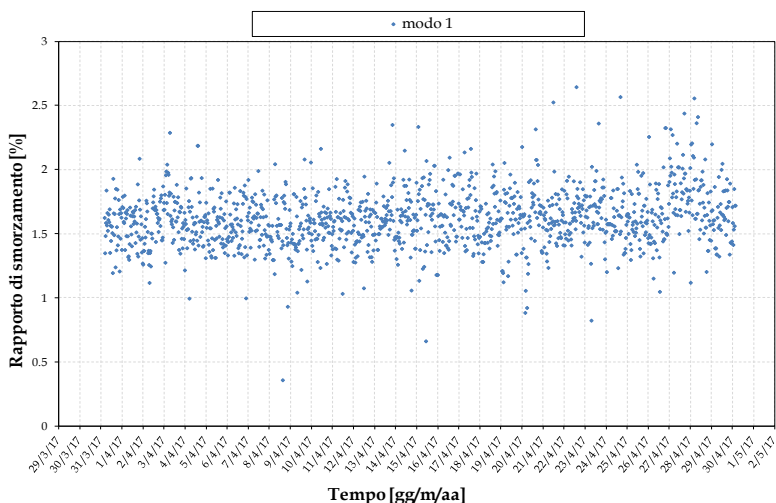


Figura 5.15 - Tracking dello smorzamento del primo modo di vibrazione durante il mese di Aprile 2017.

Come emerso anche nel capitolo precedente, un monitoraggio strutturale basato sull'utilizzo dei parametri dinamici delle strutture come indici di danno, risente dell'influenza dei fattori ambientali ed operativi a cui l'edificio è sottoposto. Quindi, con lo scopo di valutare l'insorgenza di stati di danneggiamento, è opportuno rimuovere tale influenza dei fattori ambientali ed operativi dalle stime effettuate. Di

seguito si propone una procedura per la rimozione degli effetti ambientali e l'individuazione degli stati di danneggiamento.

5.1.3 Procedure di identificazione del danno

Uno dei principali problemi associati all'impiego di tecniche di analisi statistica dei dati riguarda la difficoltà di gestire vettori di dati caratterizzati da dimensione elevata. Molti dei metodi, come quelli che prevedono l'utilizzo dei control chart, dipendono dalla disponibilità di dati di training. La quantità di dati necessaria al training, tuttavia, aumenta in maniera esponenziale al crescere della dimensione dei campioni (Silverman, 1986).

Da un punto di vista pratico, esistono due possibili soluzioni al problema. Il primo consiste nel raccogliere un'adeguata quantità di dati di training. Sfortunatamente, in molte situazioni di interesse ingegneristico, ciò non è possibile a causa di limitazioni nella durata e nella disponibilità economica dei programmi di prova. Il secondo approccio consiste nel ridurre la dimensione dei dati fino a un punto in cui i dati disponibili risultano finalmente sufficienti. La riduzione della dimensione può essere ottenuta o scartando, secondo un approccio razionale, i dati ritenuti poco interessanti, oppure attraverso combinazioni lineari o non lineari dei dati, operate ancora una volta in maniera razionale.

Ai fini del monitoraggio strutturale, oltre alla riduzione della dimensionalità del problema, è necessario rimuovere dai dati la dipendenza da fattori ambientali ed operativi. Una tecnica per la

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

riduzione della dimensione dei dati e la rimozione dei fattori ambientali è l'analisi alle componenti principali (PCA), trattata anche nel capitolo precedente.

Lo scopo dell'applicazione della PCA trattato in questo paragrafo è quello di ridurre la dimensionalità del problema e la rimozione dei fattori ambientali, senza la necessità di considerare dati di training, partendo da n vettori di variabili dipendenti ed ottenere solamente $n - 2$ variabili indipendenti (componenti principali) a cui applicare, successivamente, tecniche di clustering per il raggruppamento dei dati. Ciò è possibile quando un solo effetto è dominante, come ad esempio la temperatura. Tale clustering ha poi lo scopo di separare dati che contengono le informazioni della struttura non danneggiata, da quelli con presenza di danno.

L'algoritmo dell'analisi alle componenti principali cerca di proiettare, attraverso una trasformazione lineare, i dati registrati in un nuovo insieme p -dimensionale di coordinate cartesiane (z_1, z_2, \dots, z_p) denominate punteggi delle componenti principali. Le nuove coordinate hanno la seguente proprietà: z_1 è la combinazione lineare delle variabili originarie x_i con la massima varianza, z_2 è la combinazione lineare che spiega la maggior parte della varianza rimanente, e così di seguito. Nel caso in cui le p coordinate originali sono una combinazione lineare di q variabili, con $q < p$, le prime q componenti principali caratterizzeranno completamente i dati mentre le rimanenti $p - q$ componenti principali saranno tutte nulle. In realtà, nelle applicazioni pratiche, a causa delle incertezze di misura, tutti i

punteggi delle componenti principali (i valori delle coordinate nel sistema di riferimento trasformato) saranno tutti non nulli ed è compito dell'utente selezionare il numero di componenti principali significative.

Il calcolo delle componenti principali si esegue come descritto di seguito; i dati $\{x\}_i \quad i = 1, \dots, N$ sono elaborati in modo da formare la matrice di covarianza $[\Sigma]$:

$$[\Sigma] = \sum_{i=1}^N (\{x\}_i - \{\bar{x}\})(\{x\}_i - \{\bar{x}\})^T \quad [5.1]$$

di cui si calcola la decomposizione agli autovalori:

$$[\Sigma] = [A][\Lambda][A]^T \quad [5.2]$$

dove $[\Lambda]$ è una matrice diagonale. I punteggi delle componenti principali sono infine ottenuti come:

$$\{z\}_i = [A]^T(\{x\}_i - \{\bar{x}\}) \quad [5.3]$$

dove $\{\bar{x}\}$ è il vettore avente come componenti le medie delle corrispondenti componenti di $\{x\}_i$. Gli elementi in diagonale principale della matrice $[\Lambda]$ sono solitamente interpretati come i contributi relativi dei punteggi alla varianza. Il nuovo vettore viene, dunque, solitamente troncato considerando le q componenti che

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

consentono di raggiungere una predefinita percentuale della varianza complessiva.

L'analisi alle componenti principali, dunque, consente di scartare tutte quelle combinazioni lineari dei dati che contribuiscono marginalmente alla varianza complessiva: in tal senso, essa rappresenta una tecnica di riduzione della dimensione dei dati e la rimozione degli effetti ambientali.

Una volta ottenute le componenti principali, a differenza di altre metodologie, i dati non vengono riproiettati nello spazio originario ed effettuata l'analisi dei residui. Generalmente un valore $q=2$ consente di selezionare le componenti principali che caratterizzano la varianza principale dei dati.

I dati, così riportati nel nuovo spazio delle componenti principali, attraverso procedure di cluster possono essere raggruppati in classi, una contenente dati non danneggiati e l'altra che contiene eventuali stati di danneggiamento.

Lo scopo di tale procedura è quello di selezionare una serie di dati che contengono un evento sismico e, quindi, un probabile danneggiamento, effettuare la conversione nello spazio delle variabili principali, come descritto in precedenza, ed applicare procedure di cluster per classificare dati con presenza di danno da quelli in assenza di danno.

La procedura di cluster implementata prende il nome di K-means che permette di suddividere gruppi di oggetti in K classi sulla base dei loro attributi; ogni cluster, che rappresenta l'insieme dei punti appartenenti

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

ad una stessa classe, viene identificato mediante un centroide. L'algoritmo determina il centroide attraverso l'esecuzione di un procedura iterativa. Una volta definiti i numeri di classi da individuare (K) vengono assegnati, in maniera random o manuale, le coordinate di partenza di ciascun centroide. Quindi, ogni punto viene assegnato al centroide più vicino. Da qui il centroide di ciascun cluster viene aggiornato in funzione dei punti che gli sono stati assegnati in precedenza. Tale procedura di assegnazione ed aggiornamento viene ripetuta iterativamente fino a quando nessun punto cambia cluster o, in maniera equivalente, fino a quando i centroidi non rimangono invariati.

Per assegnare un punto al centroide più vicino è necessaria una misura della prossimità che quantifichi la nozione di "più vicino" per i dati presi in considerazione. Spesso, la distanza Euclidea (L_2) viene utilizzata per i punti nello spazio Euclideo. Tuttavia, esistono diversi tipi di misure di prossimità maggiormente adatte per specifiche tipologie di dati.

Ogni volta che i punti sono assegnati ad un cluster, il centroide può variare a seconda della misura di prossimità dei dati e dell'obiettivo del clustering. Quest'ultimo è tipicamente definito da una funzione obiettivo che dipende dalla prossimità dei punti tra di loro o dai centroidi del cluster. La funzione obiettivo, che definisce un migliore raggruppamento, è la somma dell'errore quadratico medio (Sum Squared Error SSE). Viene, quindi, calcolato l'errore di ogni punto, ovvero la sua distanza Euclidea dal centroide più vicino, e calcolata la

somma totale degli errori quadratici. La SSE è formalmente definita come segue:

$$SSE = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in C_i} dist(c_i, x)^2 \quad [5.4]$$

dove $dist$ è la distanza Euclidea (L_2) tra due oggetti nello spazio Euclideo, K il numero di cluster, C_i l' i -esimo cluster, c_i il centroide del cluster C_i ed x l'oggetto.

Dati questi presupposti è dimostrabile come il centroide che riduce al minimo l'SSE del cluster è la media ed è quindi possibile definire la seguente equazione:

$$c_i = \frac{1}{m_i} \sum_{x \in C_i} x \quad [5.5]$$

Lo step iniziale dell'algoritmo di clustering si basa sulla definizione delle coordinate dei centroidi. Spesso viene utilizzata una loro inizializzazione random che produce valori differenti di SSE per differenti esecuzioni del codice. Una scelta non ottimale dei centroidi può essere sintomo di fallimento della procedura di clustering.

Il raggiungimento dell'obbiettivo del raggruppamento di dati in cluster è strettamente legato ai dati di partenza, infatti distribuzioni di dati non ottimali non forniscono il risultato desiderato. È questa una delle principali limitazioni legate al K-means. Circostanze di non corretta separazione dei dati possono verificarsi nel caso in cui:

- vi sono tre cluster naturali di cui uno molto più grande rispetto ad altri due e a seguito del raggruppamento quello maggiore viene diviso ed inglobato in un cluster minore (Figura 5.16). È possibile asseverare che questo è un problema legato alle differenti dimensioni dei raggruppamenti naturali;

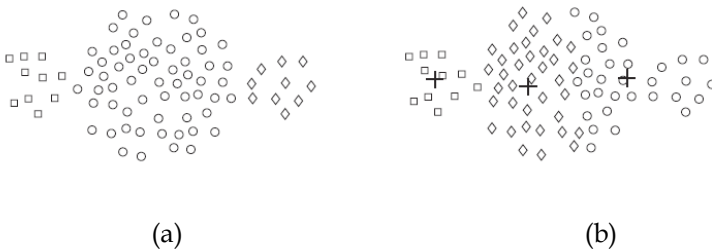


Figura 5.16 - Raggruppamenti di differenti dimensioni: punti originali (a); cluster identificati con l'algoritmo K-means (Tan et al., 2005).

- due cluster sono molto più piccoli e densi rispetto ad uno maggiore, quest'ultimo, attraverso la procedura di clustering, può essere diviso in due classi mentre, i cluster più piccoli rientrano nel medesimo raggruppamento (Figura 5.17). Causa del fallimento di questa configurazione è la differente densità dei dati;

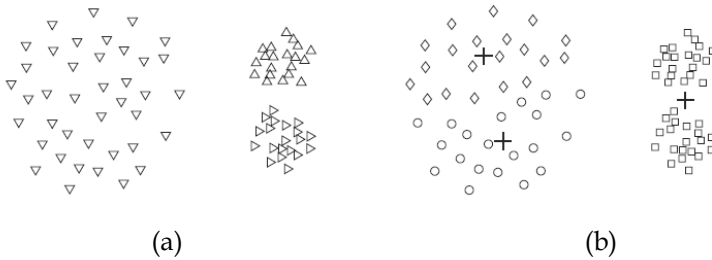


Figura 5.17 - Raggruppamenti di differenti densità: punti originali (a); cluster identificati con l'algoritmo K-means (Tan et al., 2005).

- l'algoritmo K-means individua due cluster che condividono tra loro porzioni dei due raggruppamenti naturali (Figura 5.18). Questa condizione è dovuta ad una distribuzione non globulare dei dati.

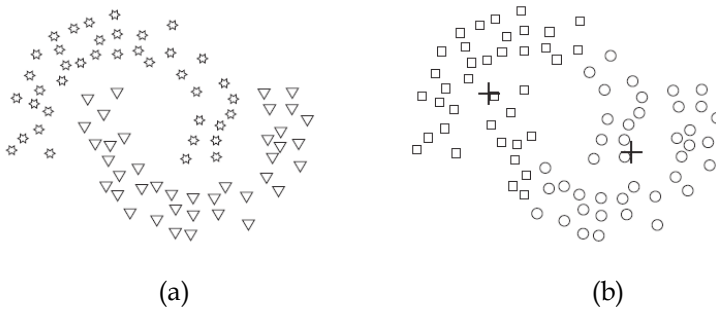


Figura 5.18 - Raggruppamenti non globulari: punti originali (a); cluster identificati con l'algoritmo K-means (Tan et al., 2005).

Tra i vantaggi dell'algoritmo K-means vi sono la velocità di esecuzione ed il basso onere computazionale. Generalmente il numero di iterazioni necessarie per definirne la convergenza è inferiore al numero

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

dei punti considerati. La qualità dei cluster ottenuti dipende dalla scelta dei valori iniziali dei centroidi e, data la velocità di calcolo, è possibile eseguire il codice per differenti valori iniziali e scegliere i valori che producono un minore SSE. Quando il numero di cluster da ottenere non è definibile univocamente a priori, la scelta di K può risultare uno svantaggio.

A seguito di quanto esposto, partendo dai dati del sistema di monitoraggio, è possibile dapprima rimuovere l'influenza dei fattori ambientali e ridurre la dimensionalità del problema mediante l'applicazione della PCA e, successivamente, applicare l'algoritmo K-means per il raggruppamento di dati con presenza di danno da quelli privi di danno.

Di seguito verrà applicata tale procedura ad una serie di dati registrati dal sistema di monitoraggio installato presso il Presidio Ospedaliero "A. Cardarelli" di Campobasso, appartenenti ad una condizione non danneggiata del sistema. Tali dati saranno sottoposti ad artificiali stati di danneggiamento e ne saranno discussi i risultati e valutate le impostazioni ottimali della procedura capaci di riscontrare fenomeni di danno a seguito di un evento sismico.

I dati scelti per l'implementazione della procedura descritta ricoprono una finestra temporale di 35 giorni, a partire dal 27 Marzo 2017 fino al 2 Maggio 2017. In quest'arco temporale sono state ottenute n. 1680 stime dei parametri dinamici della struttura (Figura 5.19), in termini di frequenze naturali, rapporti di smorzamento e forme modali, relativi ai primi quattro modi fondamentali della struttura. Di questi solamente i

valori delle frequenze naturali sono stati considerati per l'analisi (Figura 5.19).

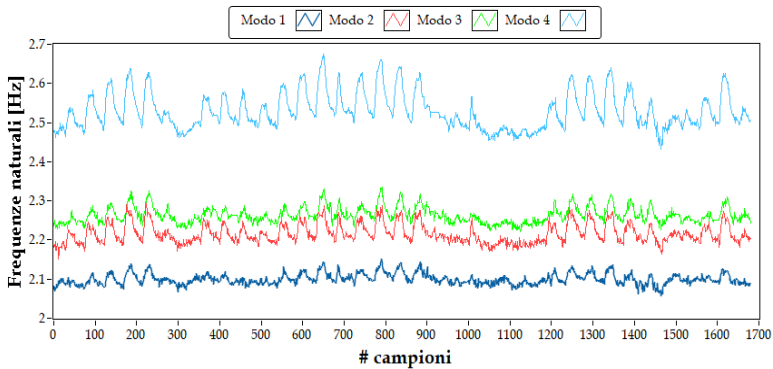


Figura 5.19 - Serie dati considerata.

Come già analizzato in precedenza, i parametri dinamici risentono dei fattori ambientali, quali la temperatura. Quindi, la prima applicazione del metodo consiste nel calcolare le componenti principali (Equazione [5.3]) a partire dalla Decomposizione ai Valori Singolari (Equazione [5.2]) della matrice di covarianza dei dati (Equazione [5.1]), per la rimozione dei fattori ambientali. Delle componenti principali ottenute a partire dalle quattro serie temporali delle frequenze, solamente due ($q=2$) sono state scelte per rappresentare la varianza principale dei dati. Ciò è stato possibile in quanto l'effetto dominante è quello della temperatura e la maggiore informazione è contenuta nella prima componente principale. Così facendo, gli effetti della temperatura sono stati rimossi, ed è quindi possibile una rappresentazione nello spazio

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

delle componenti principali (Figura 5.20a). Dei dati così rappresentati viene eseguito un raggruppamento secondo l'algoritmo K-means, impostando un numero di classi (K) pari a 2 e la posizione random dei centroidi (Figura 5.20b). Analisi aggiuntive sono state condotte valutando i risultati a seguito delle posizioni iniziali dei centroidi, ma ciò non ha prodotto alcun cambiamento in termini di raggruppamento. Nelle figure che seguono la rappresentazione dei dati nel piano delle prime due componenti principali è riportata nel primo grafico, in cui sono contrassegnati in blu i dati privi di danneggiamento (Dati N.D.) ed in rosso i dati con presenza di danno (Dati D.); mentre i risultati del cluster sono riportati nel grafico successivo, in cui il gruppo che contiene i dati non danneggiati è riportato in celeste (Dati N.D.) ed il gruppo di dati in presenza di danno in arancio (Dati D.); i centroidi dei due cluster individuati sono contrassegnati da una "X" di colore rosso. Da una prima applicazione della procedura sulle stime in assenza di danneggiamento, si nota come la maggiore variabilità dei dati risiede nella prima componente principale. Dall'applicazione della tecnica di clustering (K-means) i dati mappati nel piano delle componenti principali sono raggruppati in due classi andando ad individuare, così, due centroidi uno per i dati non danneggiati ed uno per quelli danneggiati. Com'è facile intuire, questa suddivisione risulta errata poiché i dati originali sono privi di danno. Si tratta di un problema intrinseco delle procedure di clustering in quanto tende sempre ad individuare il numero di classi K impostato.

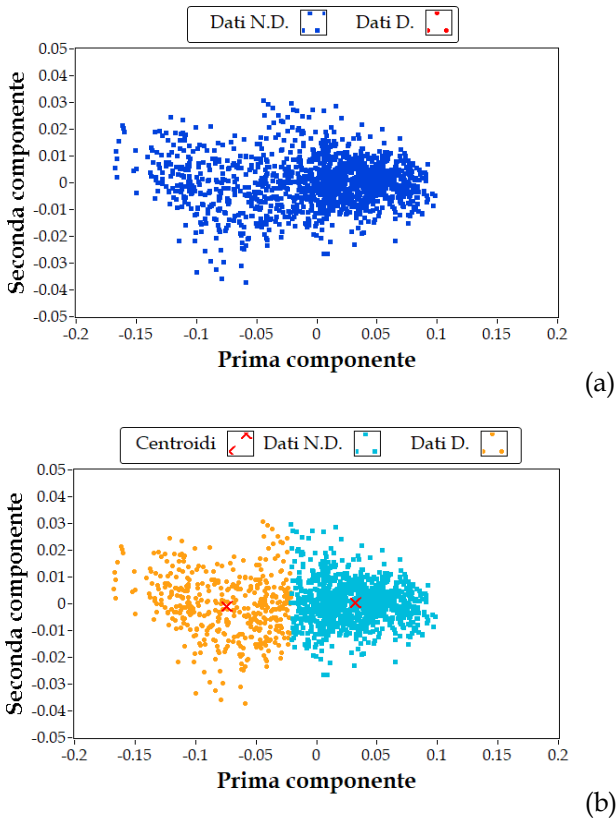


Figura 5.20 - Rappresentazione dei dati privi di danneggiamento: raggruppamento originale (a) e raggruppamento con algoritmo K-means (b).

Partendo dall'assunto che il processo di clustering individua sempre due classi di dati, una strategia di monitoraggio può essere impostata sulla variazione della distanza tra i centroidi che, in una condizione di danneggiamento, risulta maggiore.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

Come riportato anche in precedenza, i fallimenti della procedura di clustering possono verificarsi quando i dati di partenza formano gruppi di dimensioni diverse o raggruppamenti con densità differenti o forme non globulari. Quindi, per definire appropriatamente una strategia di monitoraggio basata sull'ottimizzazione dei cluster, è necessario definire un bilanciamento tra la quantità dei dati danneggiati e non danneggiati ed il livello di danno, per limitare i problemi dovuti dalle dimensioni dei raggruppamenti ed alla densità. Oltre a ciò, per ovviare a problemi legati alla forma, è necessario individuare livelli di danneggiamento a partire dai quali il danno è riscontrabile.

A seguito di tali osservazioni sulle limitazioni delle procedure, per il set di dati utilizzato è stato simulato un danneggiamento riducendo (*drop* percentuale) in termini percentuali tutte le frequenze stimate. I livelli di danno (D) considerati sono: 0.5%, 1%, 2%, 3%, 5%, 10% e 20%. Per effettuare un bilanciamento dei dati danneggiati e non, l'applicazione del *drop* è avvenuta valutando differenti livelli percentuali di dati non danneggiati rispetto alla totalità dei dati ($\%ND$). Tali percentuali considerate variano dallo 0% al 100% esaminando livelli intermedi del 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90% e 95% ($\%ND$). I limiti estremi del 100% e 0% indicano rispettivamente la totale assenza di danno e la totalità dei dati che presentano danno. Esempio di danno simulato del 5% considerando una percentuale di dati non danneggiati del 40% ($\%N.D=40\%$) è riportata in Figura 5.21.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

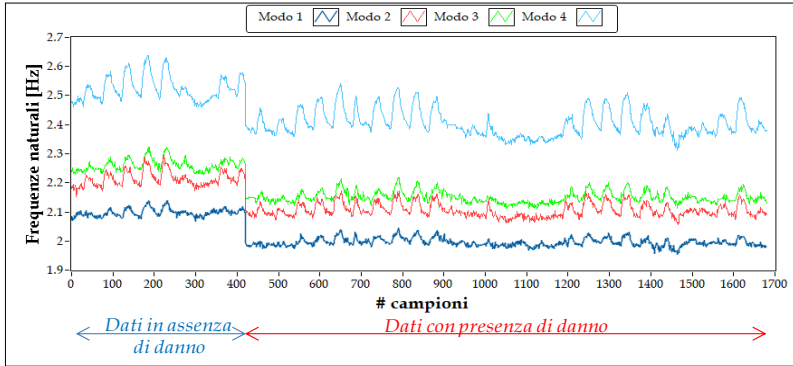


Figura 5.21 - Danno del 5% con percentuale dei dati non danneggiati del 40% (ND=40%).

| DISTANZA TRA CENTROIDI | | | | | | | | | |
|------------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| % Danno | % Dati Non Danneggiati | | | | | | | | |
| | 0% | 5% | 10% | 25% | 50% | 75% | 90% | 95% | 100% |
| 0.50% | 0.104 | 0.103 | 0.104 | 0.106 | 0.109 | 0.107 | 0.107 | 0.105 | 0.105 |
| 1% | 0.104 | 0.101 | 0.103 | 0.104 | 0.109 | 0.108 | 0.108 | 0.105 | 0.105 |
| 2% | 0.103 | 0.099 | 0.104 | 0.113 | 0.127 | 0.108 | 0.110 | 0.106 | 0.105 |
| 3% | 0.102 | 0.103 | 0.116 | 0.136 | 0.163 | 0.125 | 0.115 | 0.108 | 0.105 |
| 5% | 0.100 | 0.121 | 0.159 | 0.216 | 0.247 | 0.227 | 0.234 | 0.112 | 0.105 |
| 10% | 0.094 | 0.413 | 0.436 | 0.451 | 0.474 | 0.455 | 0.462 | 0.452 | 0.105 |
| 20% | 0.084 | 0.870 | 0.893 | 0.907 | 0.930 | 0.912 | 0.918 | 0.909 | 0.105 |

Tabella 5.4 - Distanza tra i centroidi per differenti livelli di danno (%D) e percentuali di dati non danneggiati (%ND).

Con i livelli di danno (D) considerati e per ciascuna percentuale di dati non danneggiati (%ND) è stata stimata la variazione della distanza tra i centroidi dei due cluster identificati. Risultati di tale analisi sono apprezzabili in Tabella 5.4, Figura 5.22 e Figura 5.23. Si nota come in

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

assenza di danno ($\%ND=100\%$) la distanza tra i centroidi è pari a 0.105. Valori simili sono riscontrabili assumendo tutta la serie affetta da danno ($\%ND=0\%$). Ciò era auspicabile in quanto i dati presentano la stessa distribuzione.

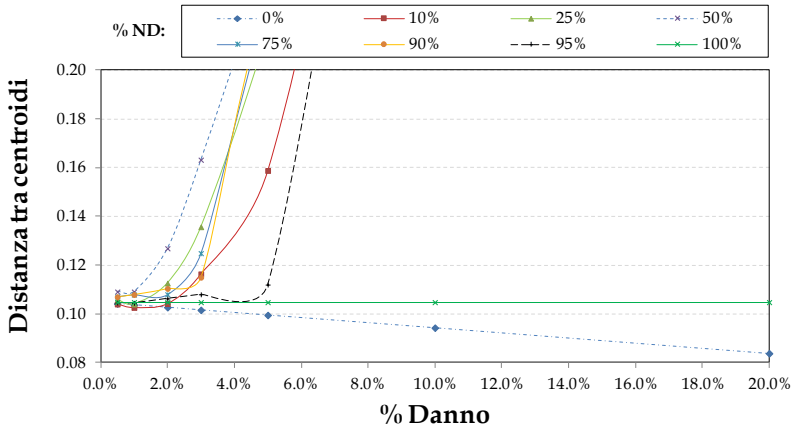


Figura 5.22 - Rappresentazione grafica della distanza tra i centroidi per differenti percentuali di dati non danneggiati (%ND).

Inoltre, variazioni significative della distanza si registrano per livelli di danno maggiori del 5%, mentre per bassi valori di danno compresi tra 0.5% e 2% non si riscontra una notevole variazione della distanza (0.104 - 0.127) per ciascuna percentuale di dati non danneggiati. Differenze più rilevanti, invece, si iniziano ad osservare per livelli di danno del 3%, la cui distanza tra i centroidi assume un valore di 0.163 per $\%ND=50\%$.

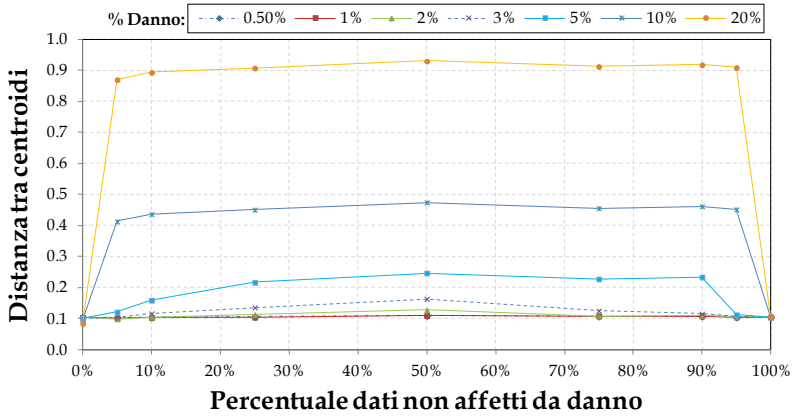
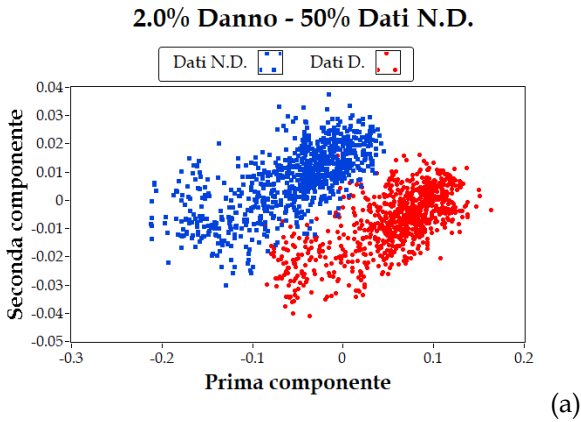


Figura 5.23 - Rappresentazione grafica della distanza tra i centroidi per differenti livelli di danno (%D).



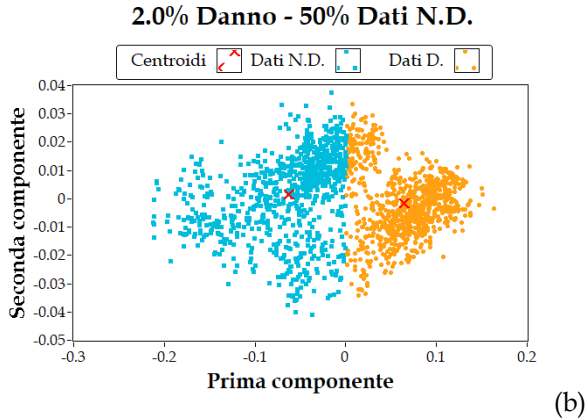


Figura 5.24 - Rappresentazione dati nello spazio delle componenti principali: raggruppamento ottimale (a); raggruppamento K-means (b) ($D=2\%$; $\%ND=50\%$).

Per valutare anche in maniera grafica l'effetto dei cluster sui dati analizzati si riporta in Figura 5.24a quello che dovrebbe essere il raggruppamento ottimale, ed in Figura 5.24b il raggruppamento dei dati per effetto del cluster, entrambi rappresentati nello spazio delle componenti principali con $D=2\%$ e $\%ND=50\%$. Si nota come la separazione dei dati non è soddisfacente e non facilmente distinguibile anche nella rappresentazione ottimale (Figura 5.24a).

Invece, per livelli di danno $D=3\%$ (Figura 5.25) l'effetto dell'applicazione del cluster, considerando una percentuale dei dati non danneggiati $\%ND=50\%$, manifesta l'efficacia della procedura individuando quasi correttamente le due classi di dati. Inoltre è

possibile osservare come i due centroidi tendano ad allontanarsi dall'origine degli assi, incrementando, quindi, la loro distanza.

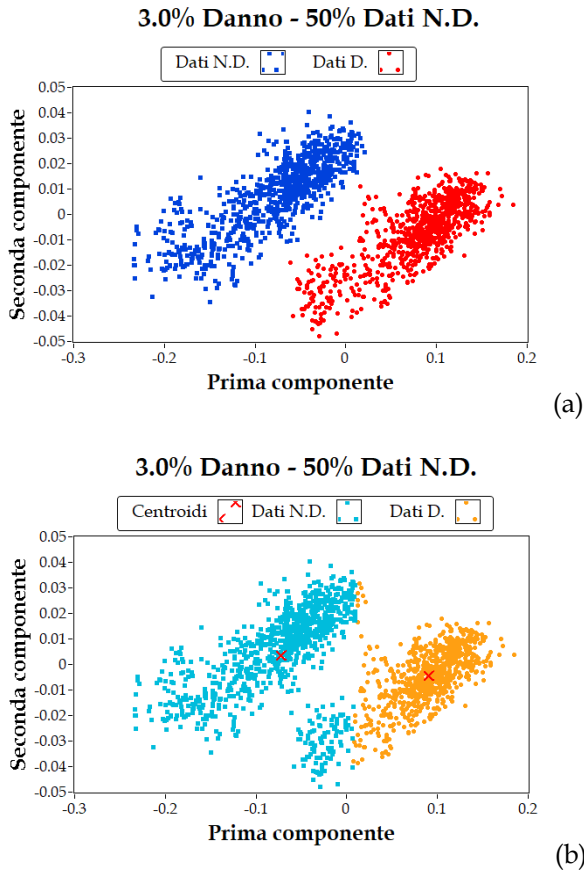


Figura 5.25 - Rappresentazione dati nello spazio delle componenti principali: raggruppamento ottimale (a); raggruppamento K-means (b) ($D=3\%$; $\%ND=50\%$).

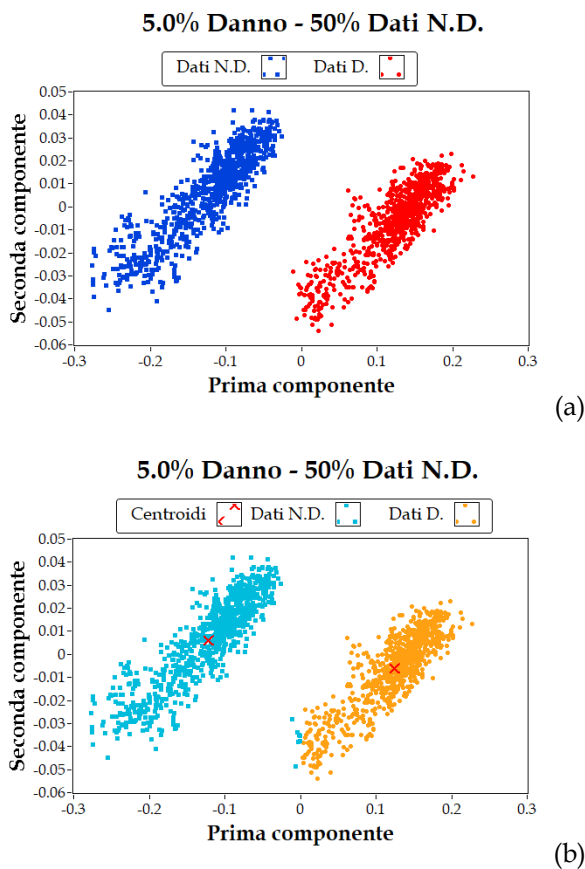


Figura 5.26 - Rappresentazione dati nello spazio delle componenti principali: raggruppamento ottimale (a); raggruppamento K-means (b) ($D=5\%$; $\%ND=50\%$).

Per livelli di danno $D=5\%$, sempre considerando una percentuale dei dati non danneggiati $\%ND=50\%$ (Figura 5.26), l'individuazione delle

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

classi di dati risulta corretta, infatti anche i centroidi hanno incrementato la loro distanza relativa.

In definitiva, dall'analisi dei risultati ottenuti il livello di danno del 3% rappresenta il minimo valore riscontrabile da tale procedura e ciò impone l'impostazione di un bilanciamento, tra dati danneggiati e non, del 50% ($\%ND=50\%$) per una sua identificazione, individuando una soglia della distanza tra i centroidi del 0.163, superata la quale è possibile riscontrare il danno. Tale valore di soglia può variare in funzione della finestra temporale scelta. Mentre, percentuali di dati non danneggiati sino al 90% ($\%ND=90\%$), a cui corrisponde ad una minore quantità di dati in presenza di danno, consentono l'identificazione di stati di danneggiamento più rilevanti e maggiori del 5% ($D \geq 5\%$).

Un'ulteriore analisi condotta mira ad individuare la lunghezza ottimale della finestra della serie temporale alla quale applicare la procedura esposta. Tale studio è stato condotto calcolando la variazione della distanza tra i centroidi dei due cluster al variare della finestra temporale, impostando un bilanciamento tra dati non danneggiati e dati danneggiati del 50% ($\%ND=50\%$). I risultati per un livello di danno del 3% sono rappresentati in Figura 5.27, in cui si evidenzia come finestre temporali maggiori di 10 giorni forniscano una stima della distanza variabile nell'intorno di 0.145 ± 0.01 e, pertanto, sono da considerarsi ottimali per l'individuazione dei danni a seguito di eventi sismici.

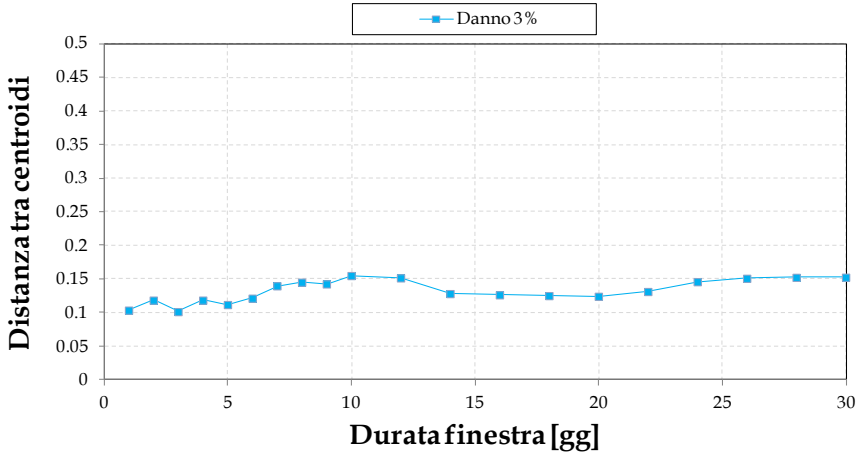


Figura 5.27 - Variazione della distanza dei centroidi al variare della finestra temporale.

In conclusione, la procedura qui descritta vede l'applicazione, in un primo step, del metodo della PCA per eliminare l'influenza di fattori ambientali ed operativi e ridurre la dimensionalità del problema in due variabili indipendenti, e la successiva applicazione dell'algoritmo di clustering K-means per il raggruppamento di dati che contengono informazioni della struttura sana da quelli della struttura danneggiata. Le analisi condotte hanno definito come per una corretta identificazione del danno, questo deve risultare maggiore del 3% ed è necessario utilizzare finestre temporali superiori a 10 giorni che contengano almeno il 50% dei dati riportanti informazioni sulla struttura non danneggiata. L'individuazione di stati di danneggiamento si basa, quindi, sulla stima della distanza relativa tra i centroidi delle due classi di dati, ed in tal senso è stato individuato un

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

limite di 0.163, che deve essere valutato a seconda della dimensione della finestra temporale considerata. Quindi, tale procedura consente di individuare stati di danneggiamento della struttura, del 3%, a seguito di un evento sismico analizzando le serie temporali delle frequenze naturali.

5.1.4 Eventi sismici registrati

Dal giorno dell'installazione, 23 Marzo 2016, il sistema di monitoraggio presso il P.O. "A. Cardarelli" oltre alla registrazione della risposta strutturale in condizioni operative ha registrato la risposta della struttura durante gli eventi sismici di bassa entità avvenuti nella provincia di Campobasso e quelli di maggiore intensità che hanno interessato il centro Italia nel 2016.

Una lista degli eventi sismici registrati durante il periodo di monitoraggio sono riportati in Tabella 5.5.

| EVENTI 2016 | | | | |
|-------------|---------------------|-----------|--------------------|------------|
| ID | Data e Ora | Magnitudo | Località | Profondità |
| 001-16 | 2016-04-04 17:36:27 | 3.1 | Campobasso | 15 |
| 002-16 | 2016-04-04 18:39:12 | 1.6 | Campobasso | 14 |
| 003-16 | 2016-04-04 19:40:42 | 1.4 | Campobasso | 13 |
| 004-16 | 2016-04-04 20:58:56 | 1.9 | Campobasso | 11 |
| 005-16 | 2016-04-05 03:46:50 | 1.8 | Campobasso | 11 |
| 006-16 | 2016-04-05 04:14:05 | 2.1 | Campobasso | 11 |
| 007-16 | 2016-05-30 07:45:51 | 2.4 | Macchiagodena (IS) | 10 |
| 008-16 | 2016-08-09 19:52:53 | 3.5 | Campobasso | 21 |
| 009-16 | 2016-08-24 01:36:32 | 6 | Rieti | 4 |

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

| | | | | |
|--------|---------------------|-----|-------------|---|
| 010-16 | 2016-08-24 01:56:00 | 4.4 | Rieti | 5 |
| 011-16 | 2016-08-24 02:32:29 | 5.1 | Perugia | 9 |
| 012-16 | 2016-08-24 02:33:29 | 5.4 | Perugia | 9 |
| 013-16 | 2016-10-26 21:18:05 | 5.4 | Macerata | 8 |
| 014-16 | 2016-10-30 07:40:17 | 6.5 | Norcia (PG) | 9 |

EVENTI 2017

| ID | Data e Ora | Magnitudo | Località | Profondità |
|--------|---------------------|-----------|------------|------------|
| 001-17 | 2017-01-08 20:11:31 | 2.4 | Campobasso | 11 |
| 002-17 | 2017-01-09 09:06:20 | 2.9 | Campobasso | 34 |
| 003-17 | 2017-01-09 09:08:29 | 2.3 | Campobasso | 22 |
| 004-17 | 2017-01-09 09:42:49 | 2.4 | Campobasso | 31 |
| 005-17 | 2017-01-09 10:16:57 | 2.5 | Campobasso | 34 |
| 006-17 | 2017-01-09 11:07:59 | 3 | Campobasso | 33 |
| 007-17 | 2017-01-09 14:06:27 | 2.8 | Campobasso | 32 |
| 008-17 | 2017-01-10 21:27:12 | 2.8 | Campobasso | 24 |
| 009-17 | 2017-01-11 13:50:29 | 2.5 | Campobasso | 19 |
| 010-17 | 2017-01-12 00:32:05 | 3.1 | Campobasso | 10 |
| 011-17 | 2017-01-12 02:11:51 | 2.7 | Campobasso | 19 |
| 012-17 | 2017-01-12 05:08:15 | 2.5 | Campobasso | 9 |
| 013-17 | 2017-01-12 05:12:25 | 2.9 | Campobasso | 10 |
| 014-17 | 2017-01-13 19:09:13 | 2.6 | Campobasso | 11 |
| 015-17 | 2017-01-15 01:33:02 | 2.6 | Campobasso | 10 |
| 016-17 | 2017-01-18 09:25:40 | 5.1 | L'Aquila | 9 |
| 017-17 | 2017-01-18 10:14:09 | 5.5 | L'Aquila | 9 |
| 018-17 | 2017-01-18 10:25:23 | 5.4 | L'Aquila | 9 |
| 019-17 | 2017-01-18 13:33:36 | 5 | L'Aquila | 10 |
| 020-17 | 2017-01-19 19:02:30 | 3 | Campobasso | 10 |
| 021-17 | 2017-03-25 21:57:46 | 3.4 | Foggia | 29 |

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

| | | | | |
|--------|---------------------|-----|-------------------------|----|
| 022-17 | 2017-04-23 04:25:36 | 3.9 | Cagnano Varano (FG) | 30 |
| 023-17 | 2017-05-30 19:17:18 | 2.6 | Isernia | 10 |
| 024-17 | 2017-06-09 14:15:44 | 3.9 | Aquila | 12 |
| 025-17 | 2017-09-06 20:27:37 | 2.7 | Vinchiaturò (CB) | 10 |
| 026-17 | 2017-09-09 23:10:17 | 2.3 | San Massimo (CB) | 7 |
| 027-17 | 2017-09-10 19:58:09 | 3.7 | Scurcola Marsicana (AQ) | 8 |
| 028-17 | 2017-09-12 07:22:14 | 2.2 | San Massimo (CB) | 2 |

Tabella 5.5 - Lista eventi sismici registrati presso il Presidio Ospedaliero per gli anni 2016 e 2017 (<http://info.terremoti.ingv.it/>).

Si tratta di eventi che hanno eccitato la struttura con bassi livelli di scuotimento, infatti le accelerazioni massime registrate sono state dell'ordine di 0.01 g.



Figura 5.28 - Localizzazione evento sismico del 4 Aprile 2016.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

Di questi eventi sismici due sono stati selezionati per l'applicazione della procedura menzionata in precedenza. Un primo evento riportato è localizzato nelle vicinanze della struttura ospedaliera, mentre il secondo con un epicentro a circa 190 km di distanza.

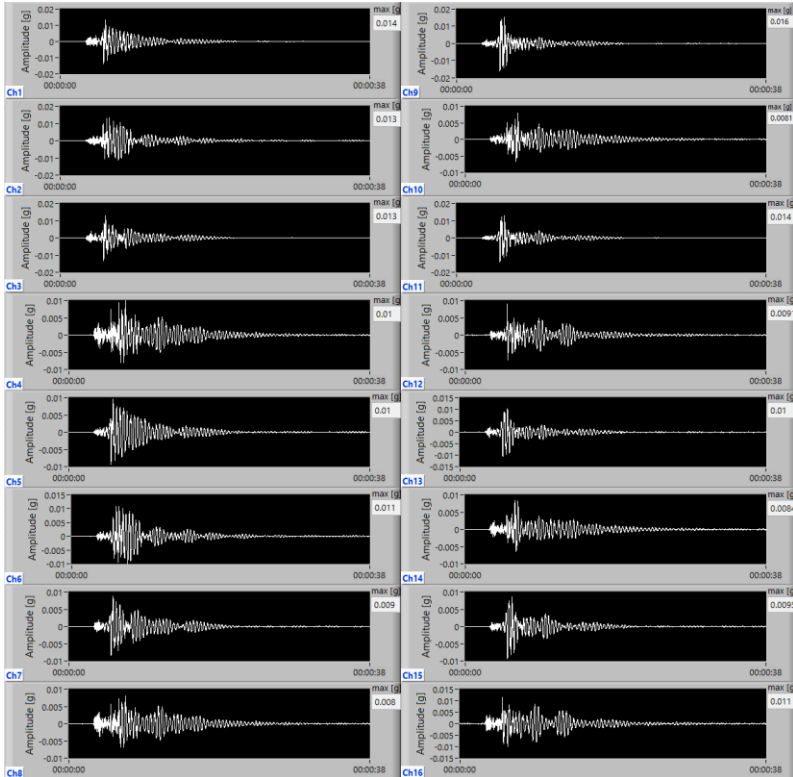


Figura 5.29 - Serie temporali registrate dal sistema di monitoraggio durante l'evento del 4 Aprile 2016 con epicentro in Campobasso.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

Un primo terremoto è stato registrato alle ore 19:37 del 4 Aprile 2016, poche settimane dopo l'installazione del sistema di monitoraggio. L'evento, di Magnitudo 3.1 (M_w), è stato localizzato ad una profondità di 15 km e ad 1 km a sud del Presidio Ospedaliero (Figura 5.28). Si tratta dell'evento tellurico registrato avente la distanza epicentrale minore. L'evento in questione ha prodotto uno scuotimento tale da rilevare in corrispondenza dell'ultimo livello un'accelerazione di 0.014 g. Le serie temporali dei sedici accelerometri installati sono riportate in Figura 5.29.

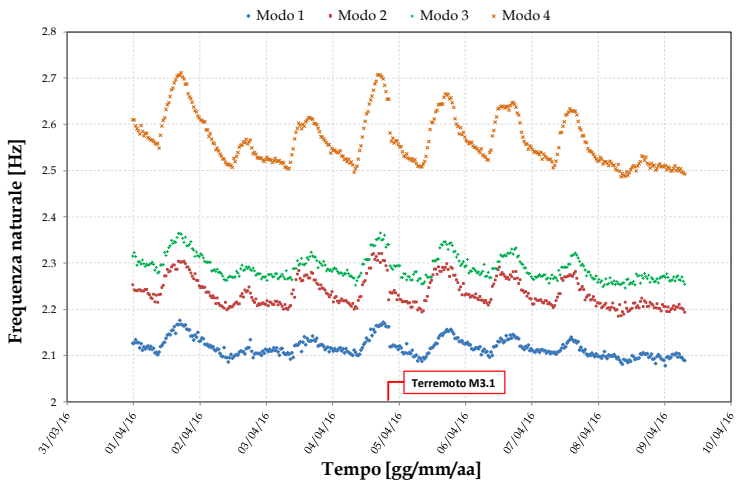


Figura 5.30 - Andamento delle frequenze naturali in concomitanza dell'evento sismico del 4 Aprile 2016.

Si riporta in Figura 5.30 l'evoluzione delle frequenze proprie della struttura da cui si osserva come i dati presentano sempre variabilità da

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

fattori ambientali, ma in concomitanza dell'evento si registra una brusca diminuzione della frequenza di ciascun modo. Il gap percentuale tra prima e dopo l'evento sismico è differente per ciascuna frequenza naturale ed assume un valore medio pari al 2.3% circa.

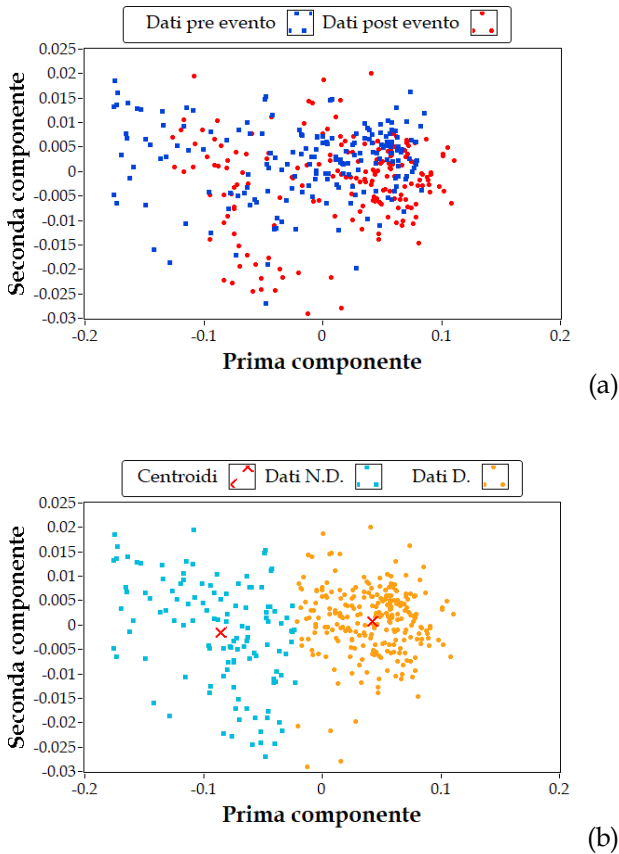


Figura 5.31 - Rappresentazione dati nello spazio delle componenti principali: raggruppamento pre e post evento (a); raggruppamento K-means (b).

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

A seguito di tale variazione riscontrata è stata applicata la procedura di clustering sulle serie temporali rappresentate nel piano delle due componenti principali. Quindi, è stato dapprima applicato il metodo della PCA e successivamente l'algoritmo di clustering K-means.

Essendo il sistema di monitoraggio operativo da poche settimane prima dell'evento sismico, solamente una breve finestra temporale a partire da quattro giorni prima dell'evento e per i successivi quattro, è stata utilizzata per l'applicazione della metodologia di identificazione del danno, andando a definire una finestra totale di otto giorni considerando una percentuale di dati non danneggiati del 50% ($\%ND=50\%$).

In Figura 5.31a sono riportati in blu e rosso rispettivamente i dati prima e dopo l'evento sismico, mentre in Figura 5.31b sono rappresentati i medesimi dati a seguito del processo di clustering, per separare eventuali dati affetti da danneggiamento (in arancio) da quelli privi (in celeste) e valutare la distanza dei centroidi tra i due gruppi di dati individuati.

Da come si può notare non è apprezzabile una separazione tra i due raggruppamenti pre e post evento (Figura 5.31a), infatti il risultato della procedura di clustering non è il medesimo (Figura 5.31b). Esaminando la distanza tra i centroidi dei due cluster individuati, questa è pari a 0.107 ed inferiore ai limiti riscontrati in precedenza corrispondenti al 3% di danno.

In definitiva, per l'evento in questione risulta difficile valutare la presenza di danneggiamento, perché al di fuori delle capacità di

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

identificazione della procedura. Come rilevato nel paragrafo precedente, sono identificabili livelli di danno maggiori del 3% (uguali per tutte le frequenze naturali). Anche separando i dati pre e post evento sismico (Figura 5.31a) non si rilevano raggruppamenti definiti tali da poter individuare uno stato di danneggiamento. Altro aspetto da tenere in considerazione è che, anche in presenza di un drop in frequenza, per via delle ridotte o quasi nulle dimensioni dei giunti strutturali, la posizione reciproca tra le strutture potrebbe essere leggermente mutata per fenomeni attritivi anche senza manifestare danneggiamenti. Quindi si rileva un drop, ma le frequenze naturali dopo l'evento recuperano il loro classico andamento.

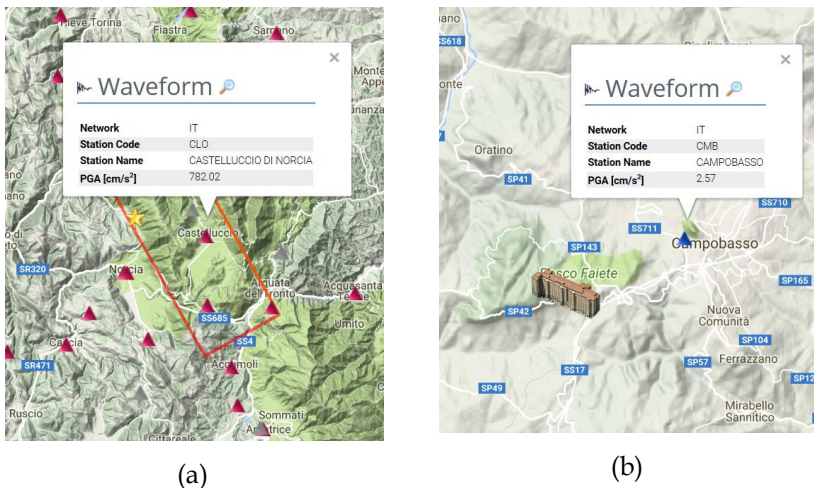


Figura 5.32 - Serie temporali registrate dal sistema di monitoraggio durante l'evento del 4 Aprile 2016 con epicentro in Campobasso.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi



Figura 5.33 - Serie temporali registrate dal sistema di monitoraggio durante l'evento del 30 Ottobre 2016 con epicentro in Norcia.

Un secondo evento sismico preso in esame è quello avvenuto alle ore 07:40:17 del 30 Ottobre 2016 e localizzato nel comune di Norcia, a circa 190 km di distanza dalla struttura ospedaliera. Si è trattato di un evento tellurico di Magnitudo 6.5 (M_w) che ha prodotto un'accelerazione massima al suolo (PGA) nella zona epicentrale di 0.797 g, valore registrato dalla stazione sismica di Castelluccio di Norcia (Figura 5.32a) (<http://.itaca.mi.ingv.it>). L'evento è stato rilevato

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

anche dalla stazione sismica di Campobasso (Figura 5.32b), riportando un'accelerazione massima di 0.003 g. Il sistema di monitoraggio installato presso il P. O. ha registrato, invece, un'accelerazione massima al livello dell'ultimo impalcato di 0.014 g. Le serie temporali catalogate dal sistema di monitoraggio sono riportate in Figura 5.33.

Allo stesso modo del caso precedente si analizzano gli andamenti delle frequenze a ridosso dell'evento in questione. Come ampiamente discusso, le frequenze manifestano variazioni dipendenti dai fattori ambientali. In concomitanza dell'evento non si rilevano riduzioni di frequenza (*drop*). Per tale motivo non è stata applicata alcuna procedura di identificazione del danno.

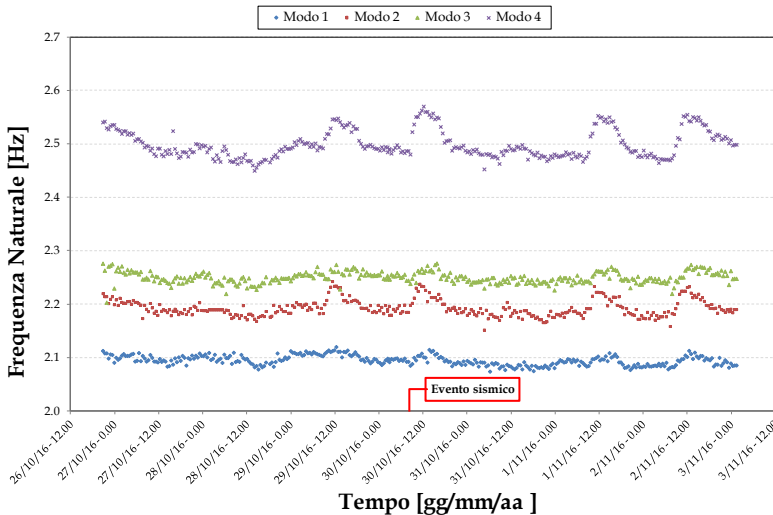


Figura 5.34 - Andamento delle frequenze naturali in concomitanza dell'evento sismico del 30 Ottobre 2016.

5.2 CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DI UN

DISTRIBUTORE AUTOMATICO DI MEDICINALI

Tra i vari componenti non strutturali presenti all'interno di una struttura ospedaliera troviamo gli armadietti per lo stoccaggio di medicinali, indispensabili all'assistenza sanitaria quotidiana. Questi spesso sono costituiti da vetrinette o armadietti non sempre ancorati, ma sono altresì presenti sistemi automatizzati che consentono di gestire i farmaci in maniera ottimale all'interno dei singoli reparti. Su quest'ultima tipologia sono state condotte prove sperimentali aventi lo scopo di caratterizzarne il comportamento dinamico.

Si tratta di un distributore robotizzato, denominato Busterspid (Figura 5.35a), per la gestione logistica del farmaco ad ogni reparto.

Esso è caratterizzato da una struttura in alluminio avente un ingombro a terra di 1.60×0.88 m ed un'altezza di 2.15 m per un peso complessivo a vuoto di 500 kg. Al suo interno è dotato di un braccio robotizzato per la movimentazione completamente automatica dei prodotti (Figura 5.35b). Ha una capacità di stoccaggio di 1500 confezioni e la possibilità di configurare il magazzino interno in funzione della dimensione del farmaco.

Come emerso si tratta di un distributore indispensabile all'uso quotidiano in reparto ed è composto da elementi meccanici al suo interno che possono subire danni a seguito di un evento sismico. Si tratta, quindi, di un componente sensibile alle accelerazioni e ciò

induce all'utilizzo di prove sperimentali per la sua caratterizzazione dinamica.

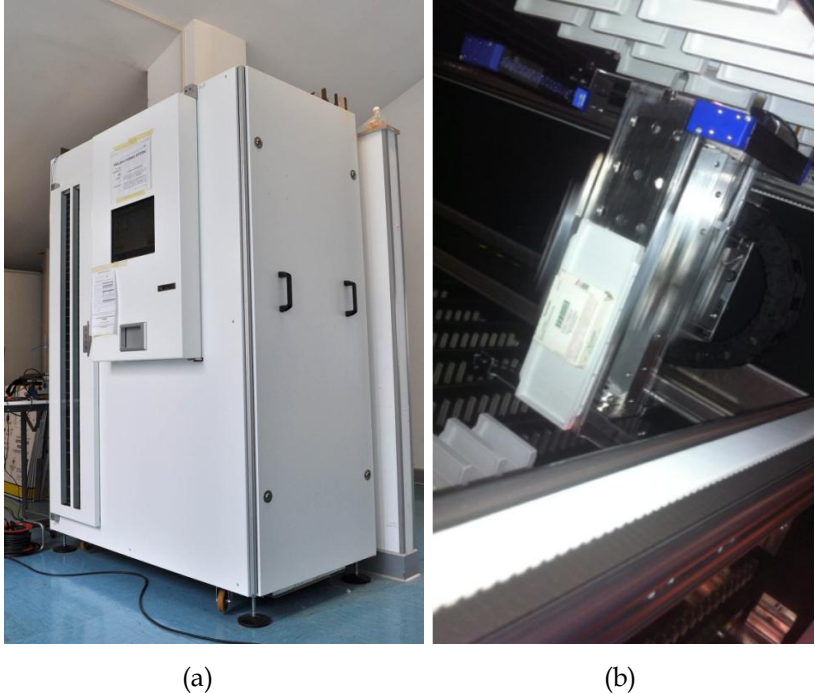


Figura 5.35. Vista esterna (a) ed interna (<https://bustersystem.gpi.it>) (b) del distributore.

A tale scopo sono state condotte prove dinamiche ad input incognito, OMA (Operational Modal Analysis), e ad input noto, EMA (Experimental Modal Analysis), su due Busterspid ubicati al primo ed al quinto livello della struttura (Figura 5.36b).

Per le prove dinamiche la catena di misura utilizzata è rappresentata da n. 4 accelerometri piezoelettrici monoassiali modello PCB 393B05

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

(Tabella 5.6) installati sulla copertura del distributore a coppie di due in due vertici opposti secondo il layout riportato in Figura 5.36a. La catena di misura è stata completata dal sistema di acquisizione CompactDAQ (Tabella 5.7), martello strumentato 086D20 (Tabella 5.8) e da un Notebook per il controllo del sistema.

| Modello | Sensibilità [V/g] | Fondo Scala [g] | Risoluzione [g rms] | Banda [Hz] | Sensibilità trasversale | Non-linearità |
|---------|-------------------|-----------------|---------------------|------------|-------------------------|---------------|
| 393B05 | 10 | 0.5 | 0.000004 | 0.2-1700 | ≤5% | ≤1% |

Tabella 5.6 - Caratteristiche dei sensori.

| Modello | Canali | Risoluzione [bit] | Frequenza di campionamento min-max [Hz] | Range dinamico [dB] | Cross-talk [dB] |
|------------|--------|-------------------|---|---------------------|-----------------|
| CompactDAQ | 16 | 24 | 2000-51200 | 102 | -100 |

Tabella 5.7 - Caratteristiche hardware di acquisizione.

| Modello | Sensibilità [mV/N] | Fondoscala [N] | Banda [Hz] | Non-linearità |
|---------|--------------------|----------------|------------|---------------|
| 086D20 | 0.23 | 22240 | Fino a 750 | ≤1% |

Tabella 5.8 - Caratteristiche martello strumentato.

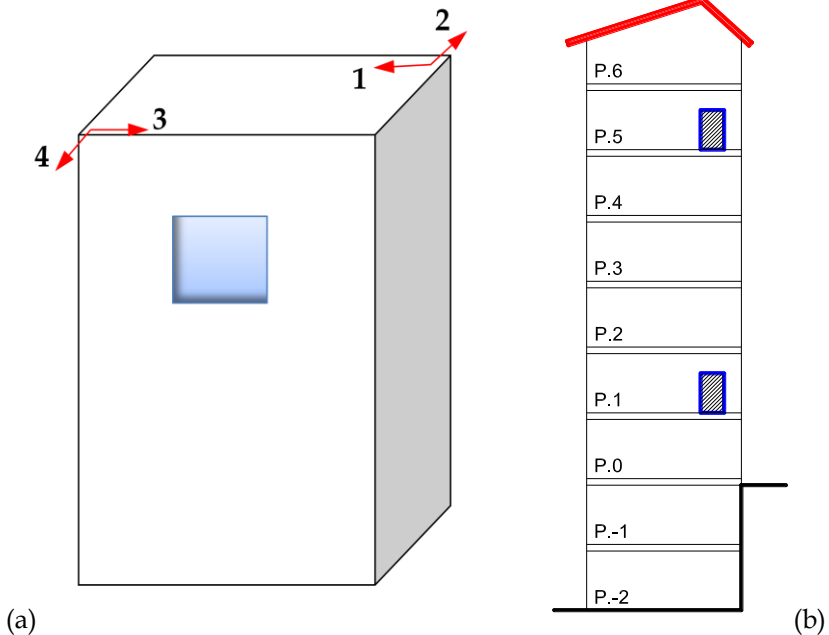


Figura 5.36 - Layout di prova (a) ed ubicazione dei due Busterspid (b).

Per le prove OMA (Figura 5.37a) si è provveduto a registrare la risposta del dispenser eccitato da rumore ambientale per una durata di un'ora con frequenza di campionamento di 100 Hz. Per le prove ad input noto (EMA) è stata registrata la risposta del dispenser ad una frequenza di 1000 Hz all'applicazione dell'impulso impartito mediante l'utilizzo di martello strumentato (Figura 5.37b). Per eccitare correttamente il Busterspid sono stati applicati impulsi a diversi livelli e direzioni utilizzando punte a differente durezza, in modo da eccitare correttamente le varie frequenze del componente. In ciascun punto di

applicazione sono stati impartiti un numero di impulsi maggiori di tre per mediare, successivamente, i risultati.

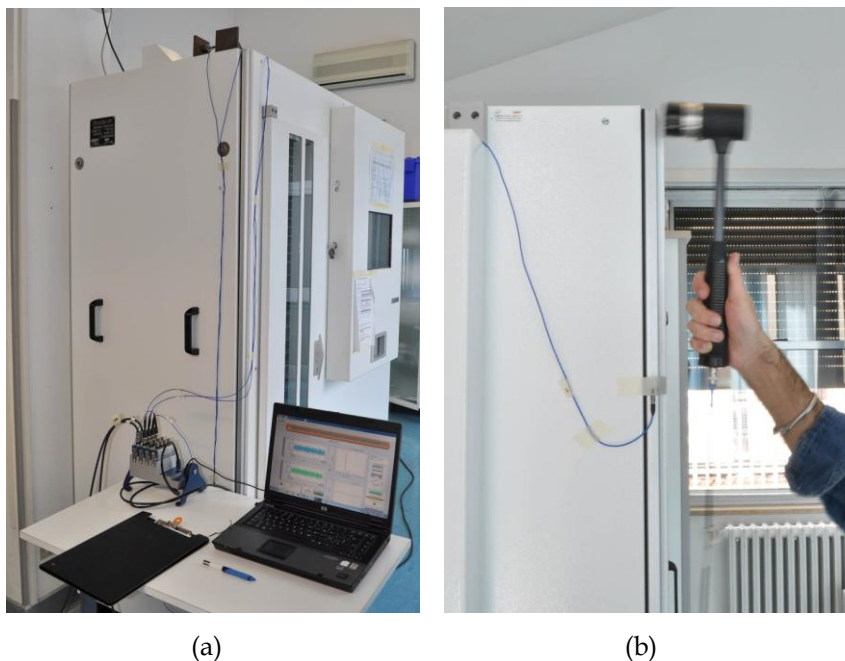


Figura 5.37 - Sensori piezoelettrici e hardware di acquisizione (a); martello strumentato (b).

5.2.1 Procedure OMA ed EMA per l'analisi dei dati

La stima dei parametri modali a partire da prove dinamiche output-only è stata eseguita, per i casi studio oggetto di tale capitolo, con metodi operanti nel dominio della frequenza, quali Frequency Domain Decomposition (FDD) (Rainieri & Fabbrocino, 2014, Brincker et al., 2000, Gade et al., 2005) e nel dominio del tempo, Covariance Driven

Stochastic Subspace Identification (Cov-SSI) (Rainieri & Fabbrocino, 2014, Peeters, 2000).

Il metodo FDD si basa sulla Decomposizione ai Valori Singolari della matrice delle densità spettrali (PSD). Come riportato da Brincker et al. (2000), i picchi di risonanza sono individuabili da un plot dei valori singolari attraverso il peak picking ed il corrispondente vettore singolare fornisce una stima della forma modale.

Mentre il metodo Cov-SSI, operante nel dominio del tempo, si basa sulla descrizione dello spazio di stato del problema dinamico (Van Overschee & De Moor, 1996; Peeters, 2000). Infatti, il problema di secondo ordine, derivante dall'equazione differenziale del moto, viene convertito in due problemi del primo ordine, definiti dalla cosiddetta "equazione di stato" e "equazione di osservazione". Tali equazioni, in condizioni output-only possono essere scritte, per un generico istante di tempo discreto $t = k\Delta t$ con $k \in \mathbb{N}$ e dove Δt è la frequenza di campionamento, nel modo seguente:

$$\begin{aligned} \{x_{k+1}\} &= [A]\{x_k\} + \{w_k\} \\ \{y_k\} &= [C]\{x_k\} + \{v_k\} \end{aligned} \tag{5.6}$$

dove $\{x_k\} = \{x(k\Delta t)\}$ è il vettore di stato in tempo discreto recante spostamenti e velocità campionate, $\{y_k\}$ rappresenta l'output, $[A]$ la matrice di stato, $[C]$ la matrice di output, $\{w_k\}$ è un vettore contenente processi bianchi di dimensione $2n \times 1$ e $\{v_k\}$ è un rumore bianco di dimensioni $q \times 1$. L'introduzione del rumore bianco $\{w_k\}$ consente di

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

tenere in conto l'inaccuratezza del modello, mentre $\{v_k\}$ rappresenta gli errori degli strumenti di misura. La relazione [5.6] può essere interpretata come un modello la cui forzante è data dal rumore bianco. Nel caso in cui la forzante esterna non sia nota a priori, ma possa essere assimilata ad un rumore bianco (tale supposizione risulta essere attendibile per forzanti tipo vento o traffico, le quali non presentano solitamente frequenze portanti definite), i rumori $\{w_k\}$ e $\{v_k\}$ modellano sia l'azione della forzante che il contributo delle incertezze sulle misure.

Per la risoluzione del modello e la determinazione delle matrici del sistema occorre uno strumento che consenta di stimare il segnale $\{y\}$ e lo stato $\{x\}$. Covariance Driven SSI (Cov-SSI) rappresenta un algoritmo per la stima delle matrici del sistema e, quindi, delle proprietà del sistema.

Per le prove EMA sono state utilizzate procedure che operano sia nel dominio della frequenza - peak picking e analisi delle Funzioni di Risposta in Frequenza (FRF) (Figura 5.38d) (Ewins, 2000) - sia nel dominio del tempo. Per quanto riguarda l'analisi nel dominio del tempo, in particolare, è stata implementata una procedura avanzata di analisi modale output-only con input esogeno nota come Combined Deterministic - Stochastic Subspace Identification (CD-SSI) (Van Overschee & De Moor, 1996).

5.2.2 Risultati

Prima dell'analisi dei dati acquisiti durante le prove OMA, questi sono stati sottoposti a valutazioni per verificare la qualità delle registrazioni eseguite e ciascuna serie temporale è stata filtrata mediante applicazione di un filtro passabanda di tipo Butterworth con ordine 6 nel range 0.2-25 Hz. Successivamente, le serie temporali sono state decimate in modo da ottenere una frequenza di campionamento finale di 50 Hz.

L'elaborazione dei dati mediante metodi nel dominio della frequenza, discussi nel paragrafo precedente, è stata condotta calcolando gli spettri e facendo riferimento a una finestra di Hanning, con un overlap del 66%. La durata delle registrazioni è sufficiente ad assicurare un elevato numero di medie. La risoluzione in frequenza adottata nel calcolo degli spettri risulta pari a 0.01 Hz.

Per quanto riguarda l'elaborazione dei dati mediante metodi parametrici nel dominio del tempo, il numero di block-righe è stato impostato a valle di un'analisi di sensibilità finalizzata ad ottimizzare la qualità del risultante diagramma di stabilizzazione. Esso è stato costruito per valori dell'ordine del modello non superiori a 60.

Le analisi eseguite mediante i differenti metodi, OMA ed EMA, hanno restituito i medesimi risultati in termini di frequenze e forme modali. Per le prove EMA (Figura 5.38) sono state utilizzate procedure di analisi operanti sia nel dominio della frequenza (FRF) (Figura 5.38c) che nel dominio del tempo (CD-SSI).

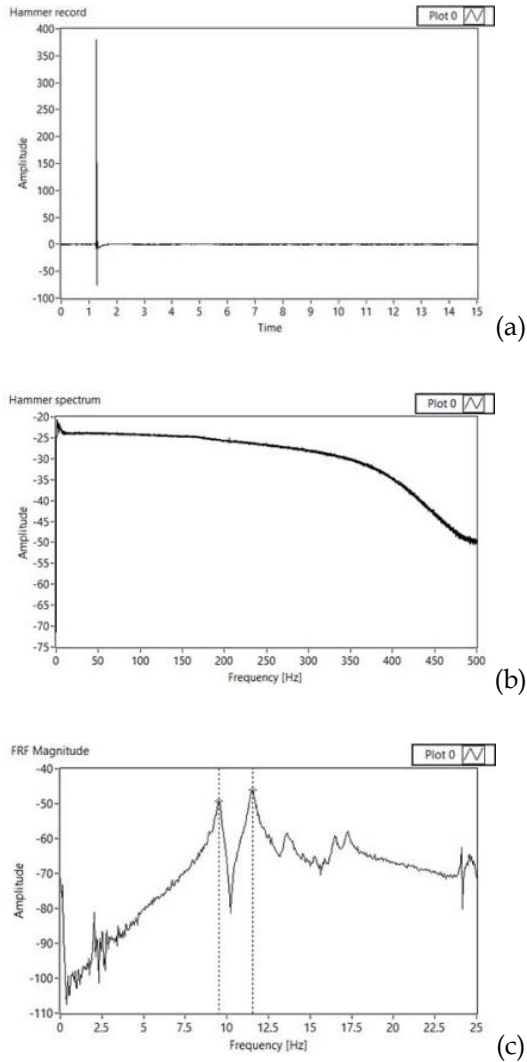


Figura 5.38 - Registrazione impulso (a); spettro dell'impulso (b); Funzione di Risposta in Frequenza (FRF) (c).

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

Prima dell'applicazione di tali metodi, per ciascun punto di applicazione dell'impulso, sono state selezionate un numero minimo di tre serie temporali (Figura 5.38a) scegliendo tra quelle prive di disturbi e con uno spettro dell'impulso piatto (Figura 5.38b). I risultati ottenuti con ciascun metodo di analisi sono, poi, stati mediati.

| Modo | Operational Modal Analysis | | Experimental Modal Analysis | |
|------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | f _{BS-1piano} [Hz] | f _{BS-5piano} [Hz] | f _{BS-1piano} [Hz] | f _{BS-5piano} [Hz] |
| I | 6.40 | 6.27 | 6.07 | 6.30 |
| II | 9.25 | 9.65 | 9.33 | 9.51 |
| III | 11.57 | 11.96 | 11.30 | 11.52 |

Tabella 5.9 - Stima delle frequenze naturali dei Busterspid al primo e quinto piano.

La procedura di analisi qui descritta è stata applicata alle serie temporali acquisite per entrambi i distributori collocati al primo e al quinto impalcato. I risultati in termini di frequenze naturali di entrambi i Busterspid, utilizzando le differenti procedure OMA ed EMA, sono riportati in Tabella 5.9.

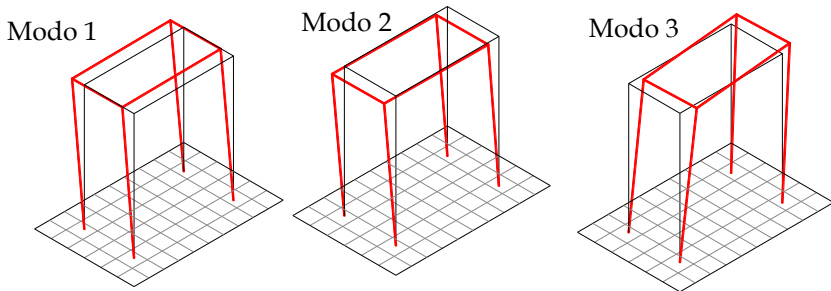


Figura 5.39 - Rappresentazione grafica delle forme modali sperimentali.

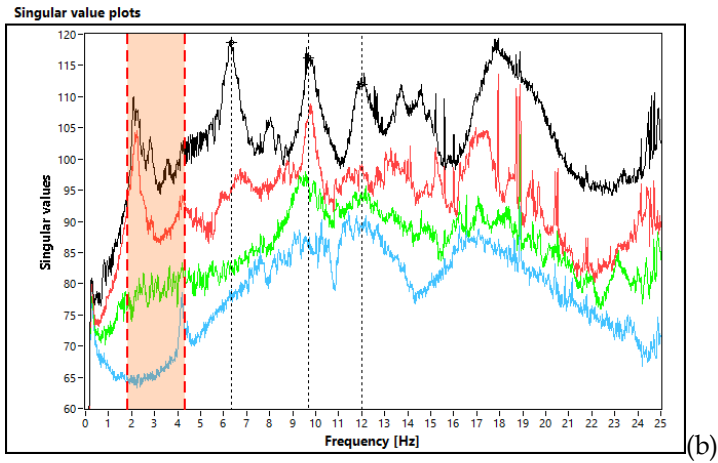
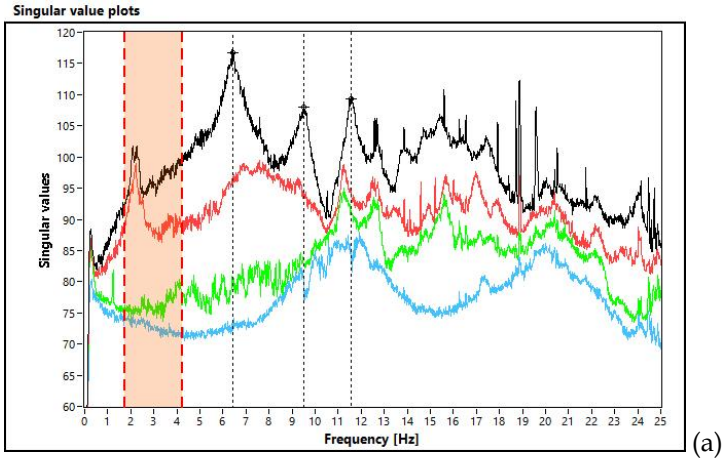


Figura 5.40 - Grafico dei valori singolari: distributore al primo piano (a); distributore al secondo piano (b). In rosso la banda di frequenza della struttura.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

La differenza in termini di frequenze tra i dispenser collocati ai differenti livelli dipende dal quantitativo dei medicinali presenti all'interno. Entrambe le prove sperimentali, OMA ed EMA hanno fornito i medesimi risultati. Le prime due frequenze sono relative a modi flessionali nelle due direzioni, mentre la terza riguarda il modo torsionale associato ad una traslazione longitudinale. Una rappresentazione grafica indicativa delle forme modali identificate è riportata in Figura 5.39.

Osservando i diagrammi dei valori singolari (Figura 5.40) delle registrazioni in condizione di rumore ambientale, oltre alle frequenze sopra identificate, sono presenti dei picchi di risonanza nella banda tra 2 e 4 Hz che non rappresentano frequenze del distributore, ma frequenze di risonanza della struttura. Infatti, i modi fondamentali di quest'ultima rientrano proprio in una banda 2-4 Hz (Figura 5.10). Si nota, inoltre, che la risposta della struttura è maggiormente marcata nella registrazione del dispenser collocato al quinto piano (Figura 5.40b) rispetto a quello collocato al primo piano (Figura 5.40a). Dai risultati ottenuti è emerso come le frequenze naturali di entrambi i distributori rientrino in una banda di frequenza tra 6 e 12 Hz, ben al di sopra delle frequenze fondamentali della struttura (2-4 Hz).

Se da un lato è emerso come non vi siano fenomeni di doppia risonanza struttura-componente, dall'altro è stato rilevato come la risposta della struttura influenzi la risposta del distributore in funzione di dove quest'ultimo è collocato. Ciò sottolinea come, nello

sviluppo di un sistema di monitoraggio basato sulla registrazione della

risposta di componenti all'eccitazione ambientale, si deve essere in grado di distinguere frequenze di risonanza del componente da quelle della struttura.

5.3 SERBATOIO

Nella funzionalità delle strutture ospedaliere i serbatoi rivestono un ruolo vitale. Essi sono impiegati come stoccaggio di carburante per i generatori elettrici in caso di interruzioni nella rete elettrica principale, come serbatoi di accumulo d'acqua per l'impianto idrico o antincendio, o per lo stoccaggio di gas medicali in pressione, come ad esempio l'ossigeno. Sono spesso posizionati in locali posti al piano terra e sono dotati di gruppo pompa, oppure possono essere collocati in copertura consentendo l'afflusso d'acqua per gravità. Ve ne sono di differenti forme: a sviluppo verticale, generalmente caratterizzati da elevati rapporti tra altezza e diametro e fissati al suolo su 3 o più supporti; a sviluppo orizzontale poggiati su supporti; a sviluppo verticale con la base posta a diretto contatto con il terreno che può essere fissata o non. Dal loro impiego si comprende come siano indispensabili nel garantire la funzionalità del Presidio Ospedaliero subito dopo un evento sismico. Come visto nel Capitolo 2 (Paragrafo 0) a seguito di eventi tellurici possono subire danni alle connessioni e, quindi, scivolare o ribaltarsi danneggiando i collegamenti con le tubazioni e innescando così effetti di danneggiamento secondari come gli incendi. Si tratta, quindi, di componenti sensibili alle accelerazioni e per tale motivo una

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

loro caratterizzazione da un punto di vista dinamico può consentire l'attuazione di opportune strategie di monitoraggio.

A tale scopo nel presente paragrafo verrà trattata la caratterizzazione dinamica di un serbatoio ad asse verticale per lo stoccaggio d'acqua a pressione atmosferica, valutandone la risposta dinamica a seguito di un danneggiamento e confrontando i risultati ottenuti con un modello agli elementi finiti.



Figura 5.41 - Serbatoio in acciaio oggetto di sperimentazione.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

Il serbatoio oggetto di prova (Figura 5.41), caratterizzato da un cilindro in acciaio del diametro di 65 cm, altezza di 154 cm e 1 mm di spessore, è saldato su tre supporti in acciaio dello spessore di 3 mm che non sono equamente dislocati lungo la circonferenza del serbatoio. In tre punti del serbatoio sono, altresì, presenti attacchi per le tubazioni di adduzione e scarico.

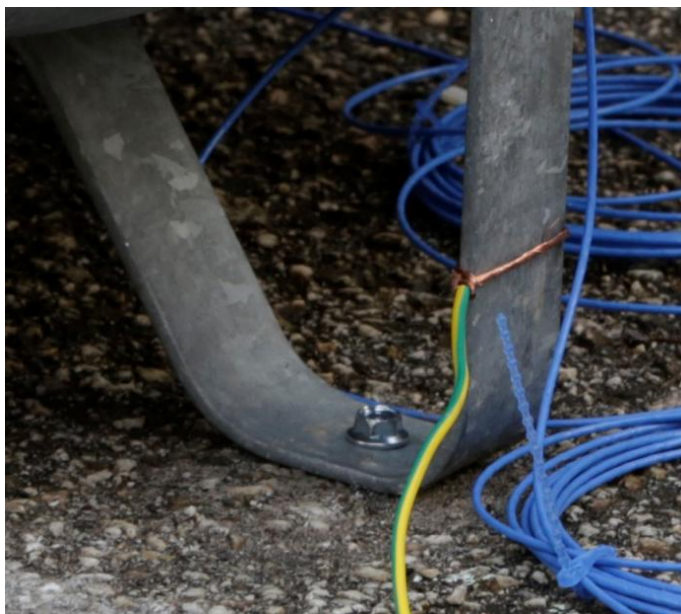


Figura 5.42 - Serbatoio ancorato al suolo mediante viti di fissaggio (non danneggiato).

Sul serbatoio in questione sono state eseguite prove di identificazione dinamica output-only considerando differenti condizioni di vincolo e per ciascuna n. 5 diversi livelli di riempimento (0%, 25%, 50%, 75%,

90% e 100%). In una prima configurazione di vincolo il serbatoio è stato considerato privo di danneggiamento alle connessioni ed è stato fissato al suolo in corrispondenza di ciascun supporto mediante viti del diametro di 6 mm (Figura 5.42).



Figura 5.43 - Serbatoio non ancorato al suolo (danneggiato).

Una seconda configurazione è stata considerata per valutare l'influenza dei parametri dinamici del serbatoio simulando un tipico stato di danneggiamento delle connessioni. Infatti, come emerso dalla casistica di danni di serbatoi all'interno di strutture ospedaliere (Figura 2.30), questi subiscono lo sfilamento delle viti di serraggio che ne possono causare lo scivolamento o il ribaltamento. Tale condizione di

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

danneggiamento è stata impartita svitando la vite di ancoraggio di ciascun supporto (Figura 5.43).

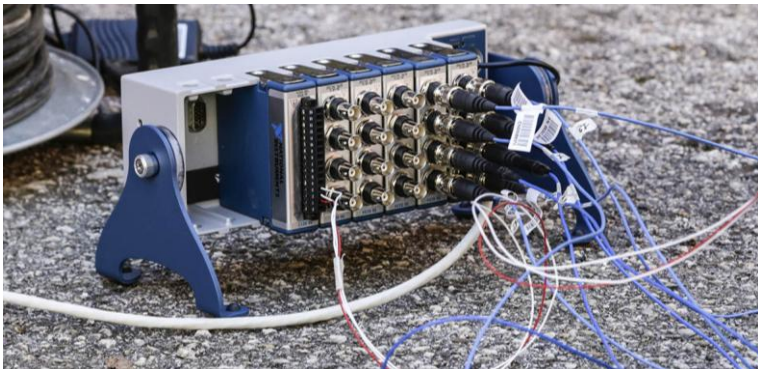
Per evitare fenomeni di interazione struttura-serbatoio, come quanto rilevato per il caso del distributore, le prove sono state condotte in ambiente esterno con il serbatoio ancorato direttamente al suolo.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.44 - Accelerometri piezoelettrici (a); sensore di temperatura (b); centralina di acquisizione (c).

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

La risposta del serbatoio alle vibrazioni ambientali è stata registrata mediante l'utilizzo di accelerometri piezoelettrici monoassiali ad elevata sensibilità (mod. PCB 393B05) e centralina di acquisizione Compact DAQ le cui specifiche sono riportate rispettivamente in Tabella 5.6 e Tabella 5.7. La catena di misura per le prove è stata completata da un sensore RTD per la misura della temperatura ambientale, al fine di valutare possibili fenomeni legati alle variazioni termiche. In ogni modo le prove sono state condotte evitando l'irraggiamento diretto del sole sulle pareti del serbatoio.

La fonte di eccitazione ambientale per il serbatoio è stata fornita principalmente dal traffico veicolare e dal vento.

Per ciascuna condizione, danneggiata e non danneggiata e ciascun livello di riempimento, la risposta del serbatoio è stata registrata per la durata di 90 minuti considerando n. 3 differenti layout (Figura 5.45) ed utilizzando una frequenza di campionamento di 400 Hz. Per ogni layout sono stati installati, a mezzo di supporto magnetico, un numero massimo di otto accelerometri dislocati come segue:

- *Layout 1* n. 8 accelerometri installati nella sola sezione centrale;
- *Layout 2* n. 4 accelerometri posizionati nella sezione centrale (contrassegnati con l'asterisco rosso in Figura 5.45b) ed i restanti quattro nella sezione di sommità (sezione 3);

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

- *Layout 3* n. 4 accelerometri posizionati nella sezione centrale (contrassegnati con l'asterisco rosso in Figura 5.45b) ed i restanti quattro nella sezione in basso (sezione 1).

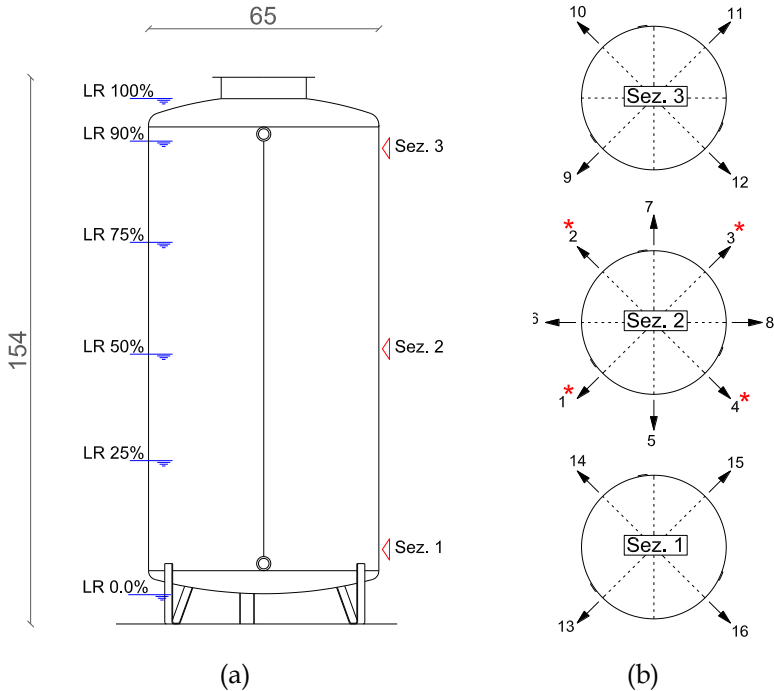


Figura 5.45 - Vista frontale del serbatoio (a) e layout di prova (b).

La scelta della tipologia di sensore da utilizzare è scaturita, oltre a specifiche prestazionali in termini di sensibilità e range di frequenza, a seguito di valutazioni del rapporto di massa tra i sensori ed il serbatoio, attestando tale rapporto ad un livello del 3% (sensore e

supporto magnetico) in modo da non influire sui parametri dinamici della struttura.

5.3.1 Risultati sperimentali

Un serbatoio cilindrico ad asse verticale tende a vibrare secondo due direzioni in funzione di un numero d'onda assiale m ed un numero d'onda circonferenziale n . Quindi, ogni forma modale è associata ad una coppia di valori (m, n) (Haroun, 1983). È facile rendersi conto come i serbatoi siano caratterizzati da numerose combinazioni di forme modali. Tuttavia, l'attenzione per la prova in oggetto è stata focalizzata all'identificazione delle forme modali associate ad un numero d'onda assiale $m=1$ e ad un massimo di 4 forme d'onda circonferenziali ($n=4$). L'installazione degli otto sensori nella sezione centrale fissa il numero massimo di onde circonferenziali identificabili.

I metodi per la stima di parametri dinamici del serbatoio sono i medesimi di quelli utilizzati per la caratterizzazione dinamica del distributore (FDD e Cov-SSI). In aggiunta ai software utilizzati in precedenza e sviluppati dal gruppo di ricerca dell'Università degli Studi del Molise, le serie temporali di ciascuna prova sono state elaborate anche con l'ausilio del software MACE (Reynders et al., 2014) sviluppato dai ricercatori dell'Università KU Leuven in Belgio, perché in grado di fornire anche informazioni sulla variabilità della stima.

Per ottenere le forme modali dell'intero serbatoio è necessario effettuare l'assemblaggio dei risultati, in termini di forme modali, ottenuti nei differenti layout. Ciò è stato possibile, in quanto, per

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

ciascun layout di prova n. 4 sensori N_{ref} (denominati *reference sensor* e riportati con l'asterisco rosso in Figura 5.45b) non hanno subito variazioni di posizione, mentre, i restanti quattro sensori N_{rov} (denominati *roving sensor*) hanno subito spostamenti nei tre differenti layout di prova. In questo modo le forme modali ottenute dai N_{ref} nel secondo e terzo setup di prova sono scalate rispetto a quelle identificate nel primo layout attraverso una costante di scala α :

$$\{\psi_{ref,1}^k\} = \alpha_{1,i}^k \{\psi_{ref,i}^k\} \quad [5.7]$$

dove $\{\psi_{ref,1}^k\}$ e $\{\psi_{ref,i}^k\}$ sono la porzione della k-esima forma modale in corrispondenza dei sensori N_{ref} . Attraverso il metodo dei minimi quadrati è possibile determinare il fattore di scala per combinare le altre porzioni delle forme modali nel vettore della forma modale completa.

Prima dell'analisi dei dati acquisiti durante le prove OMA, questi sono stati sottoposti a valutazioni per verificare la qualità delle registrazioni eseguite e ciascuna serie temporale è stata filtrata mediante applicazione di un filtro passabanda di tipo Butterworth con ordine 6 nel range 0.2-200 Hz. Di ciascuna serie temporale è stata selezionata, per l'analisi, una finestra temporale di 1800 secondi.

L'elaborazione dei dati mediante metodi nel dominio della frequenza (FDD) è stata effettuata calcolando gli spettri facendo riferimento a una finestra di Hanning, con un overlap del 66%. La risoluzione in frequenza adottata nel calcolo degli spettri risulta pari a 0.01 Hz.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

Per quanto riguarda l'elaborazione dei dati mediante metodi parametrici nel dominio del tempo (Cov-SSI), il numero di block-righe è stato impostato a valle di un'analisi di sensibilità finalizzata ad ottimizzare la qualità del diagramma di stabilizzazione.

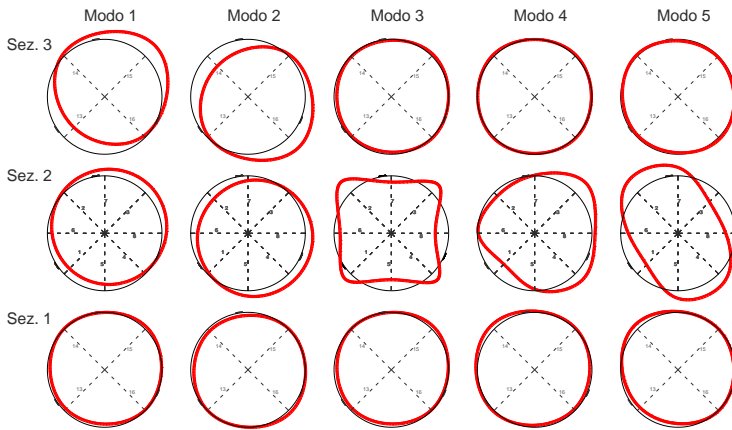


Figura 5.46 - Rappresentazione grafica delle forme modali identificate.

Dall'analisi dei dati cinque forme modali sono state identificate per ciascuna configurazione. Una loro rappresentazione grafica è riportata in Figura 5.46, da cui si può notare come le prime due rappresentano forme modali globali di tipo flessionale in due direzioni ortogonali, mentre le restanti sono forme modali locali che interessano prettamente la sezione centrale del serbatoio. Anche altri picchi di risonanza sono presenti nelle analisi delle serie temporali, come visibile dal diagramma dei valori singolari in Figura 5.47, ma l'attenzione è stata focalizzata sui primi cinque, in quanto facilmente

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

identificabili, essendo la stima dei modi superiori più complessa e le forme modali non sempre correttamente identificabili per via del layout adottato. I modi identificati sono stati altresì validati con la modellazione agli elementi finiti, che sarà discussa in seguito. C'è da precisare che il quinto modo è riscontrabile solamente con un livello di riempimento maggiore del 50%, tale risultato è stato riscontrato anche con il modello agli elementi finiti.

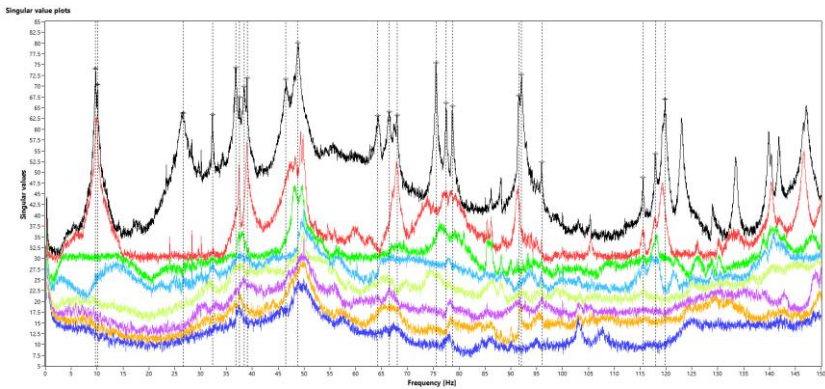


Figura 5.47 - Diagramma Valori Singolari ottenuto nella configurazione non danneggiata con livello di riempimento del 90%.

| modo | l.r. 0% | | l.r. 25% | | l.r. 50% | | l.r. 75% | | l.r. 90% | | l.r. 100% | |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | $f - 2\sigma$ [Hz] | $f + 2\sigma$ [Hz] | $f - 2\sigma$ [Hz] | $f + 2\sigma$ [Hz] | $f - 2\sigma$ [Hz] | $f + 2\sigma$ [Hz] | $f - 2\sigma$ [Hz] | $f + 2\sigma$ [Hz] | $f - 2\sigma$ [Hz] | $f + 2\sigma$ [Hz] | $f - 2\sigma$ [Hz] | $f + 2\sigma$ [Hz] |
| 1 | 25.386 ± 0.027 | 21.770 ± 0.058 | 16.201 ± 0.021 | 12.623 ± 0.011 | 9.697 ± 0.006 | 8.386 ± 0.016 | | | | | | |
| 2 | 25.734 ± 0.037 | 22.118 ± 0.018 | 16.705 ± 0.024 | 13.085 ± 0.017 | 10.045 ± 0.014 | 8.677 ± 0.028 | | | | | | |
| 3 | 99.917 ± 0.021 | 82.557 ± 0.040 | 49.982 ± 0.019 | 38.780 ± 0.024 | 36.812 ± 0.019 | 37.040 ± 0.110 | | | | | | |
| 4 | 148.935 ± 0.019 | 105.294 ± 0.015 | 69.076 ± 0.036 | 52.899 ± 0.009 | 48.876 ± 0.029 | 49.128 ± 0.006 | | | | | | |
| 5 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 113.819 ± 0.016 | 84.572 ± 0.013 | 77.519 ± 0.034 | 76.001 ± 0.057 | | | | |

Tabella 5.10 - Frequenze naturali ed intervallo di confidenza 2σ per differenti rapporti di riempimento in configurazione non danneggiata.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

I risultati in termini di frequenze naturali e rapporti di smorzamento, per le differenti condizioni di vincolo e livelli di riempimento (riportati nelle tabelle con la sigla l.r.), sono restituiti in Tabella 5.10, Tabella 5.11, Tabella 5.12 e Tabella 5.13, dove, in corrispondenza di ciascun valore sono indicati i limiti di incertezza della stima derivanti dalla stima statistica dell'errore con il metodo Cov-SSI (Reynders et al., 2008). Tale intervallo fornisce l'accuratezza della stima.

| modo | l.r. 0% | | l.r. 25% | | l.r. 50% | | l.r. 75% | | l.r. 90% | | l.r. 100% | | |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------|
| | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | |
| 1 | 1.14 ± 0.16 | 1.24 ± 0.13 | 1.12 ± 0.02 | 1.21 ± 0.01 | 0.48 ± 0.07 | 1.06 ± 0.02 | 1.12 ± 0.02 | 1.16 ± 0.02 | 0.84 ± 0.18 | 0.64 ± 0.03 | 0.16 ± 0.02 | 0.21 ± 0.03 | 0.47 ± 0.11 |
| 2 | 0.16 ± 0.02 | 0.22 ± 0.04 | 0.19 ± 0.02 | 0.26 ± 0.02 | 0.21 ± 0.03 | 0.47 ± 0.11 | 0.13 ± 0.01 | 0.09 ± 0.02 | 0.20 ± 0.04 | 0.12 ± 0.01 | 0.29 ± 0.05 | 0.04 ± 0.01 | 0.04 ± 0.01 |
| 3 | 0.13 ± 0.01 | 0.09 ± 0.02 | 0.20 ± 0.04 | 0.12 ± 0.01 | 0.29 ± 0.05 | 0.04 ± 0.01 | 0.05 ± 0.02 | 0.08 ± 0.01 | 0.08 ± 0.07 | 0.16 ± 0.06 | n.d. | n.d. | n.d. |
| 4 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 0.05 ± 0.02 | 0.08 ± 0.01 | 0.08 ± 0.07 | 0.16 ± 0.06 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| 5 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 0.05 ± 0.02 | 0.08 ± 0.01 | 0.08 ± 0.07 | 0.16 ± 0.06 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |

Tabella 5.11 - Rapporto di smorzamento ed intervallo di confidenza 2σ per differenti rapporti di riempimento in configurazione non danneggiata.

| modo | l.r. 0% | | l.r. 25% | | l.r. 50% | | l.r. 75% | | l.r. 90% | | l.r. 100% | |
|------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | f - 2σ [Hz] | f - 2σ [Hz] | f - 2σ [Hz] | f - 2σ [Hz] | f - 2σ [Hz] | f - 2σ [Hz] | f - 2σ [Hz] | f - 2σ [Hz] | f - 2σ [Hz] | f - 2σ [Hz] | f - 2σ [Hz] | f - 2σ [Hz] |
| 1 | 14.165 ± 0.094 | 15.660 ± 0.033 | 14.309 ± 0.087 | 13.413 ± 0.017 | 10.500 ± 0.033 | 8.718 ± 0.021 | 18.482 ± 0.086 | 19.267 ± 0.066 | 16.031 ± 0.045 | 12.840 ± 0.013 | 10.058 ± 0.015 | 8.374 ± 0.028 |
| 2 | 103.191 ± 0.206 | 83.544 ± 0.164 | 49.162 ± 0.015 | 38.939 ± 0.020 | 36.929 ± 0.032 | 36.949 ± 0.033 | 148.113 ± 0.007 | 106.791 ± 0.036 | 68.934 ± 0.015 | 53.230 ± 0.010 | 47.247 ± 0.071 | 49.107 ± 0.031 |
| 3 | 148.113 ± 0.007 | 106.791 ± 0.036 | 68.934 ± 0.015 | 53.230 ± 0.010 | 47.247 ± 0.071 | 49.107 ± 0.031 | n.d. | n.d. | 112.041 ± 0.008 | 85.122 ± 0.022 | 77.841 ± 0.047 | 76.075 ± 0.042 |
| 4 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 112.041 ± 0.008 | 85.122 ± 0.022 | 77.841 ± 0.047 | 76.075 ± 0.042 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| 5 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 112.041 ± 0.008 | 85.122 ± 0.022 | 77.841 ± 0.047 | 76.075 ± 0.042 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |

Tabella 5.12 - Frequenze naturali ed intervallo di confidenza 2σ per differenti rapporti di riempimento in configurazione danneggiata.

| modo | l.r. 0% | | l.r. 25% | | l.r. 50% | | l.r. 75% | | l.r. 90% | | l.r. 100% | |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] | $\xi - 2\sigma$ [%] |
| 1 | 2.58 ± 0.70 | 1.43 ± 0.03 | 1.60 ± 0.09 | 1.17 ± 0.02 | 0.63 ± 0.17 | 1.14 ± 0.02 | 1.36 ± 0.76 | 1.83 ± 0.07 | 1.00 ± 0.05 | 0.97 ± 0.01 | 0.53 ± 0.12 | 1.55 ± 0.03 |
| 2 | 0.79 ± 0.12 | 0.25 ± 0.16 | 0.11 ± 0.02 | 0.26 ± 0.02 | 0.21 ± 0.07 | 0.33 ± 0.03 | 0.05 ± 0.02 | 0.16 ± 0.04 | 0.14 ± 0.02 | 0.08 ± 0.01 | 0.60 ± 0.11 | 0.07 ± 0.03 |
| 3 | 0.05 ± 0.02 | 0.16 ± 0.04 | 0.14 ± 0.02 | 0.08 ± 0.01 | 0.60 ± 0.11 | 0.07 ± 0.03 | n.d. | n.d. | 0.05 ± 0.01 | 0.07 ± 0.02 | 0.12 ± 0.08 | 0.36 ± 0.04 |
| 4 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 0.05 ± 0.01 | 0.07 ± 0.02 | 0.12 ± 0.08 | 0.36 ± 0.04 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| 5 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 0.05 ± 0.01 | 0.07 ± 0.02 | 0.12 ± 0.08 | 0.36 ± 0.04 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |

Tabella 5.13 - Rapporto di smorzamento ed intervallo di confidenza 2σ per differenti rapporti di riempimento in configurazione danneggiata.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

Dai dati riportati si vede come le frequenze relative alle prime due forme modali (globali) del serbatoio nella condizione caratterizzata da supporti correttamente fissati (non danneggiato) e per ciascun livello di riempimento non sono le medesime, ma presentano una variazione di circa 0.4 Hz. Ciò dipende dal fatto che i tre supporti del serbatoio non sono equamente distanziati.

Come facilmente desumibile, per una data configurazione (danneggiata o non danneggiata), la frequenza naturale di ciascun modo diminuisce all'aumentare del livello di riempimento e, quindi, della massa; mentre, il rapporto di smorzamento manifesta un lieve incremento con il livello di riempimento (non visibile in tutti i modi). Le prime due forme modali, che rappresentano modi globali, sono caratterizzate da rapporti di smorzamento maggiori del 1%; al contrario, rapporti di smorzamento inferiori all'1% contraddistinguono i modi locali.

Diffomità in termini di frequenze naturali sono riscontrabili tra la configurazione non danneggiata e danneggiata (Tabella 5.14). Differenze significative, nell'ordine del 44% e 28%, sono osservabili rispettivamente per la prima e la seconda forma modale. Questa variazione decresce a valori del 28% e 12% per un livello di riempimento del 25%, riducendosi sempre più all'aumentare del rapporto di riempimento fino ad una differenza del 3% nel caso di serbatoio pieno. Nella configurazione danneggiata, all'incremento del livello di riempimento si assiste prima ad un incremento della frequenza naturale e poi ad una diminuzione. Ciò è giustificabile da

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

un assestamento dei supporti e quindi un irrigidimento del contatto tra l'area di base ed il suolo.

| modo | Δf [%] | | | | | |
|------|----------------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| | l.r. 0% | l.r. 25% | l.r. 50% | l.r. 75% | l.r. 90% | l.r. 100% |
| 1 | -44.20 | -28.07 | -11.68 | 6.26 | 8.28 | 3.96 |
| 2 | -28.18 | -12.89 | -4.04 | -1.87 | 0.13 | -3.49 |
| 3 | 3.28 | 1.20 | -1.64 | 0.41 | 0.32 | -0.25 |
| 4 | -0.55 | 1.42 | -0.21 | 0.62 | -3.33 | -0.04 |
| 5 | n.d. | n.d. | -1.56 | 0.65 | 0.42 | 0.10 |

Tabella 5.14 - Differenza percentuale delle frequenze naturali tra la configurazione danneggiata e non danneggiata.

Mentre le prime due frequenze naturali sono significativamente influenzate dalle condizioni di vincolo e quindi di danno, i modi locali sono insensibili alla variazione di fissaggio dei supporti, ma risentono solamente dell'influenza del livello di riempimento. Infatti, la differenza tra le frequenze dei modi locali in entrambe le configurazioni è inferiore al 3%. Anche i rapporti di smorzamento non hanno manifestato particolari variazioni alle condizioni di vincolo.

Una rappresentazione grafica dell'evoluzione delle frequenze naturali e dei rapporti di smorzamento per i cinque modi identificati al variare del livello di riempimento in entrambe le configurazioni di vincolo sono riportate in Figura 5.48 e Figura 5.49, dove, in rosso sono contrassegnate le frequenze relative alla configurazione danneggiata, mentre in blu quelle per la condizione non danneggiata.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

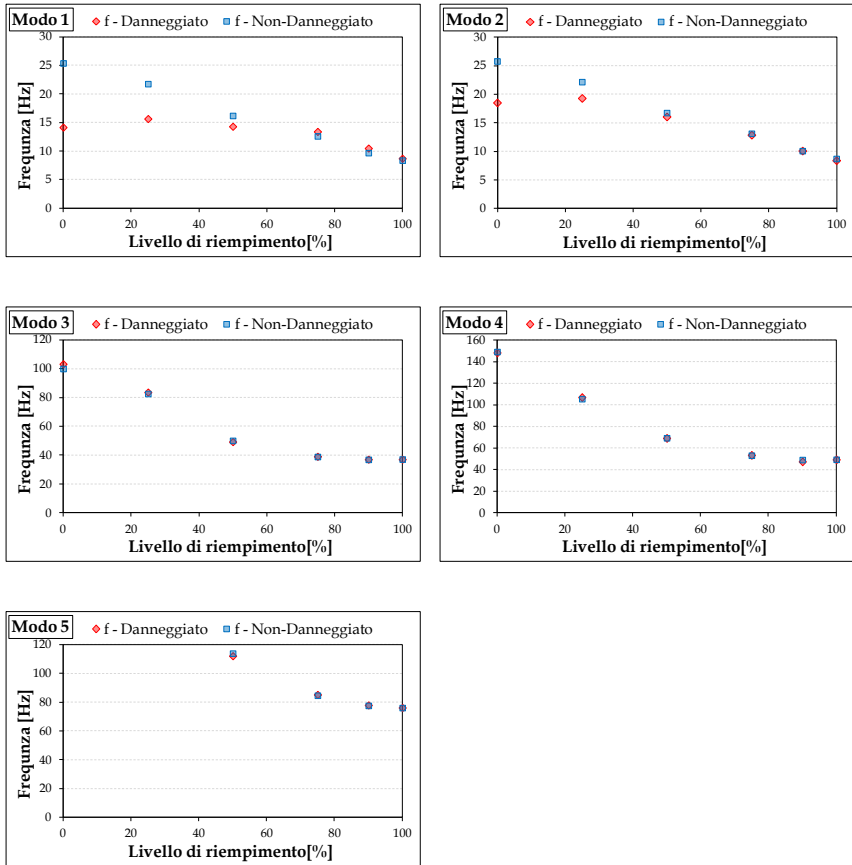


Figura 5.48 - Evoluzione delle frequenze naturali per differenti livelli di riempimento e condizioni di vincolo.

Le variazioni osservate in termini di frequenze naturali e rapporti di smorzamento non sono riscontrabili per le forme modali (Figura 5.46), che non manifestano significativi cambiamenti al variare delle condizioni di vincolo o del livello di riempimento.

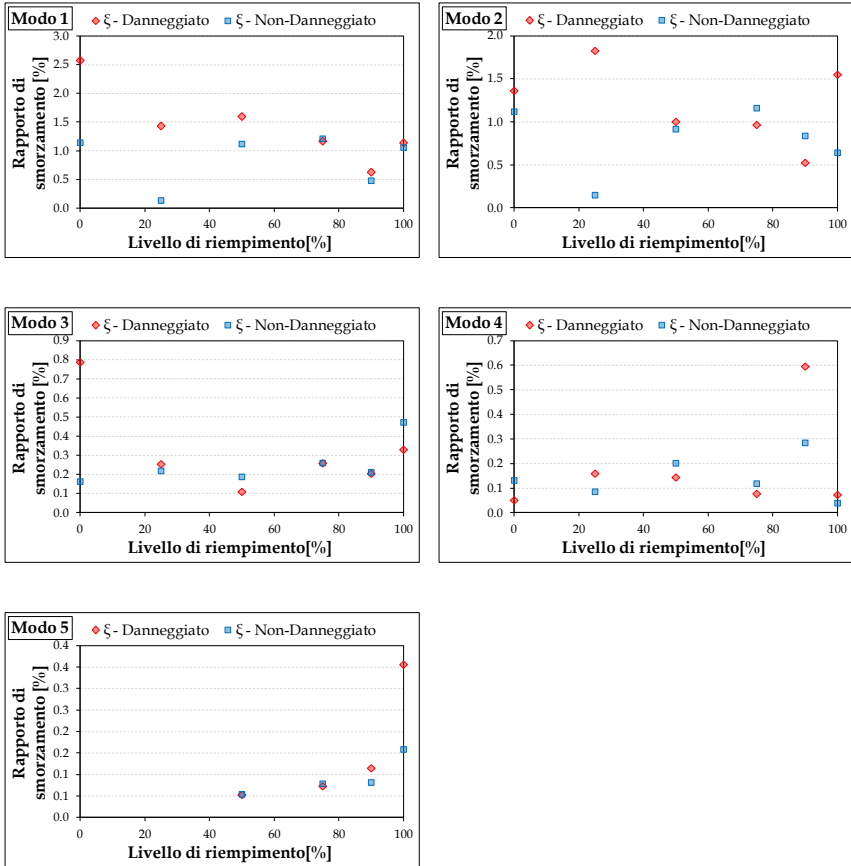


Figura 5.49 - Evoluzione dei rapporti di smorzamento per differenti livelli di riempimento e condizioni di vincolo.

5.3.2 Modello agli elementi finiti

Del serbatoio sinora discusso, di cui sono state descritte le prove dinamiche ed analizzati i risultati, è stato realizzato un modello agli

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

elementi finiti con software ANSYS APDL, con lo scopo di validare i risultati ottenuti sperimentalmente e condurre analisi aggiuntive.

A partire da un rilievo accurato delle dimensioni geometriche del serbatoio è stato realizzato il modello geometrico (Figura 5.50a), utilizzando elementi shell per la modellazione di pareti e supporti.

Il serbatoio è realizzato con acciaio al carbonio di tipo S235JR UNI EN 10025 in lamiere laminate a caldo e formate a freddo ed è trattato, ai fini di una protezione anticorrosiva, attraverso zincatura a caldo con zinco puro al 99,99%. Le proprietà dei materiali utilizzati nel modello (serbatoio e liquido) sono riportati in Tabella 5.15.

| Acciaio S235JR | Acqua |
|--|---|
| Peso specifico = 7850 kg/m ³ | Peso specifico = 1000 kg/m ³ |
| Modulo di Young = 1.98 E11 kg/m ² | Velocità onde soniche = 1500 m/s |
| Modulo di Poisson = 0.3 | |

Tabella 5.15 - Proprietà dei materiali.

Nella modellazione oltre al liquido e, quindi, all'interazione fluido-struttura, sono state considerate anche le masse di sensori e rubinetti.

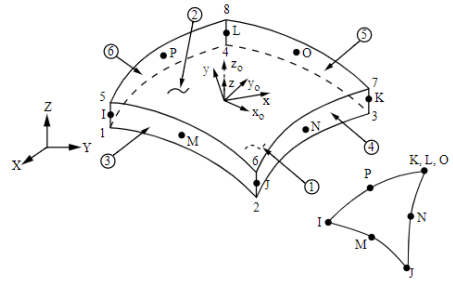
Pareti e supporti sono stati modellati con elementi SHELL 281 (Figura 5.50b) mentre il fluido con elemento acustico FLUID 220 (Figura 5.50c).

Si tratta di elementi quadratici, il primo avente otto nodi e sei gradi di libertà per ciascun nodo; il secondo caratterizzato da venti nodi

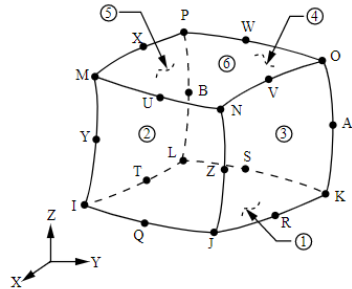
ciascuno avente tre gradi di libertà traslazionali ed un quarto grado di libertà di pressione.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.50 - Modello elementi finiti (a); elemento SHELL 281 (b); elemento FLUID 220 (c).

La dimensione della mesh è stata scelta a seguito di un'analisi di sensibilità, ovvero, quando i risultati in termini di frequenze naturali risultassero inferiori dell'1% passando da una dimensione maggiore ad

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

una inferiore. A seguito di tale analisi è stata impostata una dimensione per le pareti del serbatoio e del liquido di 2 cm, mentre per la superficie di contatto a terra è stata impostata una mesh si 0.1 cm in modo da modellare accuratamente le condizioni di vincolo.

Dapprima si è proceduto alla calibrazione del modello privo di liquido, focalizzando l'attenzione sui modi globali, in quanto, nell'ottica di uno sviluppo di un sistema di monitoraggio, sono gli unici che risentono dell'influenza delle connessioni di vincolo. Essendo le proprietà dei materiali e le dimensioni geometriche ben note e prive di incertezza, la maggior indeterminatezza e sensibilità dei risultati risiedono nelle condizioni di vincolo dei supporti al suolo. Per tale motivo sono state valutate differenti configurazioni di vincolo, modificando il numero e la posizione dei nodi vincolati.

In una prima configurazione sono stati vincolati tre gradi di libertà traslazionali (raffigurati in rosso in Figura 5.51a) di un solo nodo posto nella mezzera della base. Ciò produce una frequenza di circa 16 e 17 Hz per i primi due modi, che è al di sotto dei 25 Hz valutati sperimentalmente. Mentre, vincolando tutti i gradi di libertà traslazionali (riportati in rosso in Figura 5.51b) di tutti i nodi della base si ottiene un incremento dei primi due modi di vibrazione a circa 35 e 36 Hz, ben al di sopra dei dati sperimentali. Quindi, una condizione intermedia è quella maggiormente realistica. Infatti, vincolando i tre gradi di libertà traslazionali del nodo centrale (in rosso) e solamente il grado di libertà verticale dei nodi ricadenti in un'area di 9 mm² (contrassegnati in blu in Figura 5.51c) si ottiene un ottimo riscontro con

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

i dati sperimentali. Anche se in quest'ultima configurazione di vincolo le frequenze si discostano di 0.5 Hz dai dati sperimentali le prime due forme modali del modello risultano invertite. Questo è dovuto al fatto che la vite di fissaggio dei supporti non è perfettamente centrata nella base e, quindi, il nodo che vincola i tre gradi di libertà (in rosso) risulta spostato. Infatti, correggendo la posizione del vincolo per ciascun supporto si ha la corrispondenza dei dati sperimentali con quelli del modello sia in termini di frequenze che di forme modali. In Tabella 5.16 si riporta il confronto in termini di Δf e MAC dei primi due modi del serbatoio ottenuti con l'ausilio del modello agli elementi finiti e quelli stimati sperimentalmente.

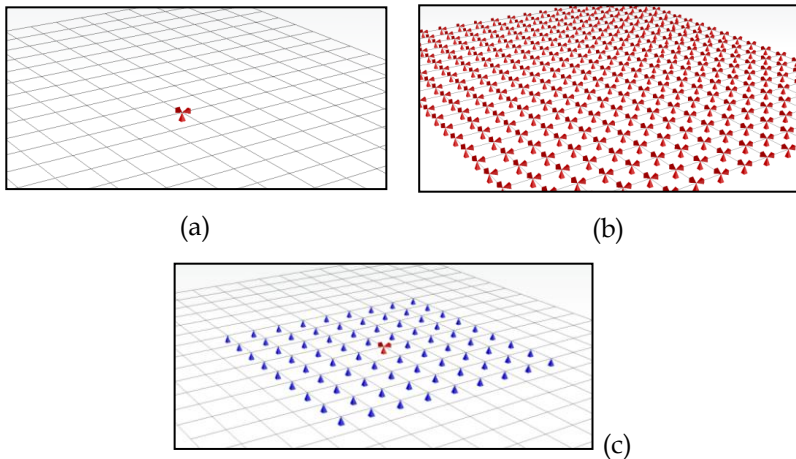


Figura 5.51 - Area di base di ciascun supporto: vincolo cerniera in un nodo (a); tutti i nodi vincolati come cerniera (b); un nodo vincolato come cerniera ed i restanti nodi vincolati secondo la direzione verticale (c).

| Modo | Sper. [Hz] | FEM [Hz] | Δf [%] | MAC |
|------|------------|----------|----------------|------|
| 1 | 25.39 | 25.73 | +1.36 | 0.98 |
| 2 | 25.73 | 26.21 | +1.87 | 0.96 |

Tabella 5.16 - Confronto dati sperimentali e modello agli elementi finiti dei primi modi globali del serbatoio vuoto.

Con le condizioni di vincolo così definite è stato considerato il liquido all'interno del serbatoio e modellato come elemento fluid 220. Per considerare l'interazione fluido-struttura, i nodi in contatto tra le pareti del serbatoio e la superficie del liquido sono state contrassegnate come FSI (Fluid Structure Interface).

Oltre ad effettuare il confronto considerando i livelli di liquido utilizzati nelle prove sperimentali, sono stati vagliati anche altri livelli di riempimento ad incrementi del 5% in modo da avere una ricostruzione maggiormente dettagliata delle frequenze naturali in funzione del rapporto di riempimento.

Un confronto in termini di Δf tra i dati sperimentali e quelli del modello dei vari modi al variare del livello di riempimento è riportato in Tabella 5.17.

A differenza dei modi globali, non è possibile effettuare un confronto delle forme modali in termini di indice MAC, in quanto, i modi locali che interessano la sezione centrale sono polarsimmetrici e qualunque direzione può essere direzione del modo. Quindi la forma modale può risultare ruotata rispetto a quella identificata sperimentalmente. Per

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

tales motivo l'associazione dei modi locali è effettuata considerando il numero di onde circolari.

| modo | l.r. 0% | | | l.r. 25% | | | l.r. 50% | | |
|------|------------------|----------------|------|------------------|----------------|------|------------------|----------------|-------|
| | Sper. - FEM [Hz] | Δf [%] | | Sper. - FEM [Hz] | Δf [%] | | Sper. - FEM [Hz] | Δf [%] | |
| 1 | 25.39 | 25.73 | 1.4 | 21.77 | 22.57 | 3.7 | 16.20 | 16.25 | 0.3 |
| 2 | 25.73 | 26.22 | 1.9 | 22.12 | 22.91 | 3.6 | 16.71 | 16.46 | -1.4 |
| 3 | 99.92 | 101.00 | 1.1 | 82.56 | 79.81 | -3.3 | 49.98 | 51.02 | 2.1 |
| 4 | 148.94 | 148.15 | -0.5 | 105.29 | 108.48 | 3.0 | 69.08 | 69.87 | 1.1 |
| 5 | n.d | n.d | n.d | n.d | n.d | n.d | 113.82 | 112.95 | -0.76 |

| modo | l.r. 75% | | | l.r. 90% | | | l.r. 100% | | |
|------|------------------|----------------|------|------------------|----------------|------|------------------|----------------|------|
| | Sper. - FEM [Hz] | Δf [%] | | Sper. - FEM [Hz] | Δf [%] | | Sper. - FEM [Hz] | Δf [%] | |
| 1 | 12.62 | 12.46 | -1.3 | 9.70 | 9.63 | -0.7 | 8.39 | 8.20 | -2.2 |
| 2 | 13.09 | 12.64 | -3.4 | 10.05 | 9.79 | -2.5 | 8.68 | 8.35 | -3.8 |
| 3 | 38.78 | 40.74 | 5.1 | 36.81 | 37.77 | 2.6 | 37.04 | 37.73 | 1.9 |
| 4 | 52.90 | 53.77 | 1.7 | 48.88 | 49.67 | 1.6 | 49.13 | 49.45 | 0.7 |
| 5 | 84.57 | 86.32 | 2.1 | 77.52 | 77.65 | 0.2 | 76.00 | 74.50 | -2.0 |

Tabella 5.17 - Confronto dati sperimentali e modello agli elementi finiti in funzione del livello di riempimento.

L'evoluzione delle frequenze naturali per i primi due modi globali e le prime tre forme modali locali sono riportate graficamente in Figura 5.52. In blu sono contrassegnati i risultati ottenuti con la modellazione agli elementi finiti ed in rosso i risultati sperimentali. Si osserva come il modello è perfettamente calibrato con i dati sperimentali anche in presenza di liquido.

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

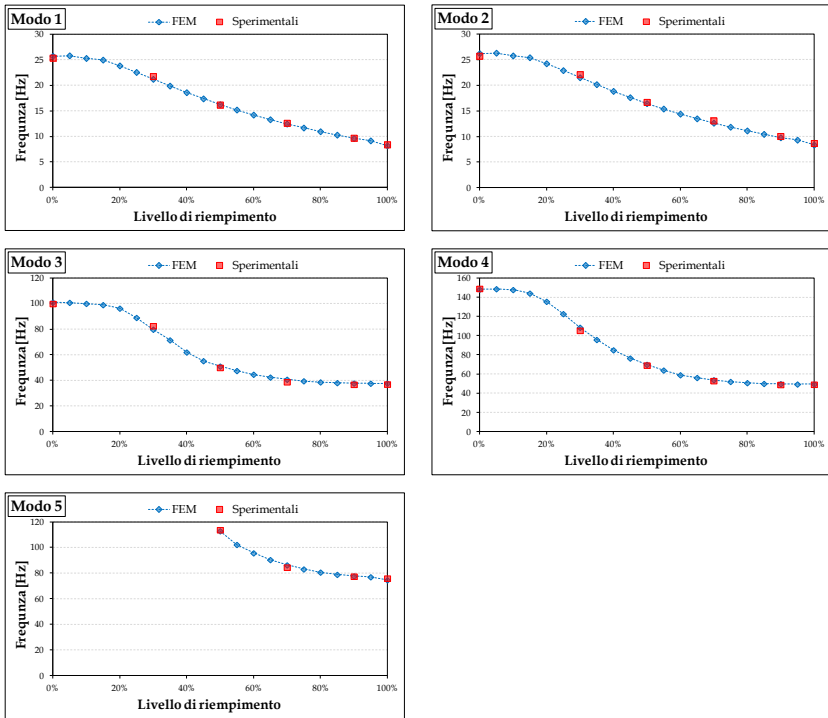


Figura 5.52 - Evoluzione frequenze naturali del modello agli elementi finiti e confronto con i risultati sperimentali.

Grazie al modello così calibrato con i dati sperimentali, altre analisi sono possibili considerando ad esempio il comportamento del serbatoio all'applicazione di un input sismico alla base o valutando il serbatoio connesso a tubazioni. Attualmente, per il lavoro in questione si è focalizzata l'attenzione solamente all'integrazione dei dati sperimentali con altri valori di riempimento forniti dal modello.

5.3.3 Strategie di monitoraggio per serbatoi

Dall'analisi dei risultati ottenuti sono state riscontrate chiare indicazioni sul monitoraggio dello stato di salute dei serbatoi all'interno di strutture ospedaliere. È emerso come, ipotizzando un tipico danneggiamento delle connessioni, si assista ad una variazione in termini di frequenze naturali, mentre rapporti di smorzamento e forme modali risultino indifferenti. Inoltre, è stato rilevato come una tale variazione interessi principalmente i modi globali della struttura senza avere ripercussioni sui modi locali. Si è riscontrato, inoltre, come sia difficile una corretta identificazione dei modi locali superiori.

Da ciò si può considerare un possibile monitoraggio basato sulla variazione dei parametri dinamici del serbatoio, ottenibile installando un numero ridotto di sensori accelerometrici in grado di identificare i modi globali della struttura che risultano sensibili a stati di danneggiamento. I modi globali, oltre ad essere sensibili alle condizioni di vincolo e, quindi, a stati di danneggiamento, hanno dimostrato una notevole variazione con il livello di acqua presente all'interno del serbatoio. Pertanto, in aggiunta ad un numero limitato di accelerometri è necessario completare l'architettura di monitoraggio con un sensore capace di individuare il livello di riempimento del serbatoio in modo da associare la relativa frequenza naturale.

Un sistema di monitoraggio così concepito può essere in grado di valutare i cambiamenti dei parametri dinamici della struttura in condizioni operative e a seguito di un evento sismico, con la possibilità

Capitolo 5 - Proposta metodologica e risultati applicativi

di individuare differenti possibili stati di danneggiamento come ad esempio la rottura delle connessioni o delle tubazioni.

CAPITOLO 6

CONCLUSIONI

Il lavoro di tesi condotto ha focalizzato l'attenzione sulle criticità manifestate da parte delle strutture ospedaliere a seguito di eventi sismici con lo scopo di sviluppare strategie di monitoraggio che ne possano migliorare la gestione, soprattutto a seguito di terremoti.

L'obiettivo è stato quello di sperimentare e validare una strategia di intervento capace di rendere una struttura ospedaliera *smart* - SHF -, cioè in grado di fornire informazioni sul proprio stato di salute a seguito di un evento sismico e durante l'intero corso della propria vita. Vista l'elevata eterogeneità di elementi di cui si compone un Presidio Ospedaliero sono state analizzate le problematiche riguardanti il monitoraggio basato sulle vibrazioni della componente strutturale, implementando procedure di analisi dei dati con lo scopo di individuare stati di danneggiamento. D'altro canto, per quanto attiene agli elementi non strutturali ed impiantistici l'attenzione è stata incentrata sulla caratterizzazione dinamica a titolo esemplare di alcune

Capitolo 6 - Conclusioni

tipologie specifiche al fine di definire adeguate strategie di misura ed elaborazione delle grandezze fisiche di interesse.

Per la corretta definizione del sistema di monitoraggio da adottare, in una prima fase del lavoro è stata condotta un'approfondita analisi sui danneggiamenti manifestati dalle varie strutture ospedaliere del mondo a seguito di eventi sismici passati. Queste hanno subito danni a componenti strutturali, ma anche danni ad elementi non strutturali, impiantistici ed apparecchiature medicali che, al pari dei danni strutturali, hanno causato l'interruzione dell'operatività della struttura. Sono stati analizzati, quindi, i singoli componenti individuandone le vulnerabilità ed i parametri che ne possono definire la performance. Da ciò è emerso come i vari elementi non strutturali e impiantistici ed apparecchiature medicali siano sensibili ad accelerazioni e deformazioni della struttura.

Alla luce delle criticità emerse sono state individuate le grandezze fisiche dei vari componenti che ne possono definire la performance a seguito di un evento e, quindi, lo stato di salute. Ciò ha consentito di definire un'architettura e dei criteri di progettazione di una SHF utilizzando una nomenclatura anglosassone che percorre gli step dalla A alla E (*Accuracy, Budget compliance, Computational burden, Durability, Ease of use*). Inoltre, è stata proposta un'architettura hardware di monitoraggio per i vari componenti valutando le soluzioni tecnologiche che il mercato offre con riferimento ad una casistica generica di struttura ospedaliera.

A dispetto della grande varietà dei sensori disponibili per le applicazioni reali, la misura diretta delle grandezze fisiche non è in grado di fornire una quantificazione del danno, pertanto si rendono necessarie efficaci procedure di elaborazione dei dati al fine di fornire informazioni sullo stato di salute della struttura. Quindi, in merito al monitoraggio di componenti strutturali una strategia basata sulla stima dei parametri dinamici della struttura (frequenze, smorzamenti e forme modali), a partire da misure di vibrazione condotte attraverso l'utilizzo di sensori accelerometrici, ben si presta a tale scopo. Ed in tale ambito è stata condotta un'analisi della letteratura scientifica, dalla quale si sono evidenziati metodi su base statistica per monitorare l'evoluzione nel tempo delle frequenze naturali e per la rimozione dei fattori ambientali ed operativi dalle stime.

A seguito della definizione dei criteri per l'implementazione di un sistema di monitoraggio e all'individuazione di approcci per l'identificazione del danno, un sistema di monitoraggio della componente strutturale è stato progettato ed installato presso l'ospedale "A. Cardarelli" di Campobasso. Si tratta di un sistema in grado di acquisire i dati provenienti dai sensori (n. 16 accelerometri) installati sulla struttura e fornire automaticamente la stima dei parametri dinamici. Dai dati così raccolti dal sistema è stata sviluppata una procedura per l'identificazione del danno a seguito di eventi sismici. Tale metodologia si basa sull'applicazione della PCA alle stime delle frequenze, per la rimozione dei fattori ambientali e la riduzione della dimensionalità del problema, e la successiva applicazione della

procedura di clustering K-means per il raggruppamento di dati con e senza danno. La validazione ed il range di operatività sono stati valutati introducendo stati di danneggiamento artificiali nelle serie temporali delle frequenze.

Dal giorno dell'installazione del sistema di monitoraggio è stata altresì registrata la risposta della struttura ad eventi sismici, in concomitanza dei quali è stata applicata la metodologia sviluppata per l'identificazione del danno, rilevando che, per gli eventi di bassa intensità esaminati, non si sono registrate variazioni pre e post terremoto.

Per quanto ai componenti non strutturali, invece, sono state eseguite prove dinamiche sperimentali per la caratterizzazione dinamica di un distributore per i medicinali e di un serbatoio per lo stoccaggio dell'acqua. Si tratta di tipici componenti che rivestono un ruolo importante al fine di garantire l'operatività della struttura a seguito di un terremoto. Dalle prove condotte sul distributore è emerso come, nell'ottica di un monitoraggio di componenti in condizione di rumore ambientale, è necessario conoscere la frequenza di vibrazione della struttura in modo da depurarla dalle stime ed è altresì emerso come la risposta del componente è influenzata dal comportamento dinamico della struttura. Infine, dalle prove sperimentali condotte sul serbatoio, è possibile definire come un sistema di monitoraggio basato sulla stima delle frequenze naturali dei modi globali, utilizzando un ridotto numero di sensori accelerometrici, può essere in grado di identificare stati di danneggiamento dei supporti, che rappresentano una tipica

crisi di tali componenti a seguito di eventi sismici. Inoltre, per la validazione dei parametri dinamici del serbatoio e per ispezionare altri livelli non investigati sperimentalmente, è stato realizzato un modello agli elementi finiti che ben rappresenta il comportamento dinamico del serbatoio reale.

Tale è la sintesi delle attività svolte in un ambito di ricerca assai ampio, complesso e anche interdisciplinare per le problematiche di natura tecnologica, informatica, oltre che di ingegneria strutturale, affrontate.

L'ampiezza della problematica rende ovviamente i risultati ottenuti non esaustivi, ma certamente alcuni aspetti rilevanti possono essere portati all'attenzione del lettore del presente paragrafo conclusivo.

L'esperienza documentata in queste pagine conferma la maturità di alcune tecniche di caratterizzazione dello stato attuale di componenti strutturali e non strutturali basati sulle vibrazioni.

La validazione di tali tecniche sul campo e con riferimento a strutture reali che è stata illustrata nel presente documento forniscono indicazioni confortanti per quanto attiene alla reale conseguibilità delle specifiche di base di una SHF. Tuttavia, ulteriori sviluppi sono richiesti per quanto attiene alla integrazione dei diversi livelli di monitoraggio e alla definizione delle soglie di prestazione (stati limite) dei diversi componenti.

Nondimeno, la sostenibilità tecnica e computazionale delle procedure di osservazione in continuo della risposta dinamica di componenti strutturali e non strutturali delle strutture sanitarie evidenzia tutte le potenzialità dell'approccio nel campo della gestione dell'emergenza in

Capitolo 6 - Conclusioni

occasione di sequenze sismiche e della manutenzione strutturale dei complessi edilizi e impiantistici che caratterizzano i presidi ospedalieri in zona sismica.

BIBLIOGRAFIA

- Achour N., Miyajima M., Ikemoto T., Ingaki J. (2005). Damage analysis of health care facilities in the 2004 Niigata-Ken Chuetsu earthquake, *Journal of Earthquake Engineering* 28, Paper 164, 7 pp..
- Aktan A.E., Ciloglu S.K., Grimmelsman K.A., Pan Q., Catbas F.N. (2005). Opportunities and challenges in health monitoring of constructed systems by modal analysis. *Atti della International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*, Bordeaux, Francia.
- Allemang R.J. & Brown D.L. (1998). A unified matrix polynomial approach to modal identification. *Journal of Sound and Vibration*, 211(3):301-322.
- Barthorpe R., (2011). *On model - and data-based approaches to structural health monitoring*. Tesi di dottorato, Department of Mechanical Engineering, University of Sheffield.
- Brincker R., Zhang L., Andersen P. (2000). Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition. *Atti della 18th SEM International Modal Analysis Conference*, San Antonio, TX, USA, 625–630.

Bibliografia

- Cardoso J.F. & Souloumiac A. (1996). Jacobi angles for simultaneous diagonalization. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 17: 161-164.
- Cawely P. & Adams R. (1979). The locations of defects in structures from measurements of natural frequencies. *Journal of Sound and Vibration*, 224(2), 359-374.
- Cosenza E., Di Sarno L., Maddaloni G., Petrone C., Prota A. (2014). Shake table tests for the seismic fragility evaluation of hospital rooms. *Earthquake engineering & structural dynamics*. Pubblicato online su Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/eqe.2456.
- Devriendt C., El-Kafafy M., Weijtjens W., De Sitter G., Guillaume P. (2014). Evaluation of different automated operational modal analysis techniques for the continuous monitoring of offshore wind turbines. *Atti della 9th International Conference on Structural Dynamics, EUROODYN 2014, Porto, Portugal, 30*, pp. 2239-2246.
- Doebling S.W., Farrar C.R., Prime M.B., Shevitz, D.W. (1996). Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in their Vibration Characteristics: A Literature Review. *Technical Report LA-13070-MS, UC-900*, Los Alamos National Laboratory, New Mexico 87545, USA.
- Ewins D.J. (2000). *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, 2nd ed. Research Studies Press Ltd., Baldock.
- Faison H., Comartin C.D., Elwood K. (2004). HOUSING REPORT Reinforced Concrete Moment Frame Building

-
- without Seismic Details. *World Housing Encyclopedia an Encyclopedia of Housing Construction in Seismically Active Areas of the World*.
- Farrar C.R. & Worden K., (2013). *Structural Health Monitoring - a machine learning prespective*. Jhon Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.
 - Farrar C., Doebling S., Nix D. (2001). Vibration-based structural damage identification. *Philosophical Transaction A*, 359 (1778), 131.
 - FEMA (2012). *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage - A Practical Guide*, FEMA E-74, Fourth Edition, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.
 - FEMA (2007). *Design Guide for Improving Hospital Safety in Earthquakes, Floods, and High Winds: Providing Protection to People and Buildings*, FEMA 577, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.
 - Fierro E. A., Miranda E., Perry C.L. (2011). Behavior of Nonstructural Components in Recent Earthquakes. *Architectural Engineering Conference (AEI)*.
 - Filiatrault A., Uang C.M., Folz B., Constantin C.C., Gatto, K. (2001). Reconnaissance report of Nisqually (Seattle-Olympia) February 28, 2001 Earthquake. *Structural systems research project the Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center and the Consortium of Universities for Earthquake Engineering (CUREE) Report No. SSRP-2001/2002*.

Bibliografia

- Friswell M.I. & Mottershead J.E. (1995). *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Gade S., Møller N.B., Herlufsen H., Konstantin-Hansen H. (2005). Frequency domain techniques for operational modal analysis. *Atti della 1st International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, Danimarca*, 261–271.
- Gallina G., Getuli G., Fabbrocino G. (2010). I Rapporto Commissione Revisione della valutazione di vulnerabilità sismica P.O: Cardarelli in Campobasso.
- Haroun M.A. (1983). Vibration studies and test of liquid storage tanks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 11, 179-206.
- Johnson R.A. & Wichern D.W. (1992). *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice Hall.
- Kalkan E., Banga K., Ulusoy H.S., Fletcher J.P.B., Leith W.S., Reza S., Cheng T. (2012). Advanced earthquake monitoring system for U.S. Department of Veterans Affairs medical buildings – instrumentation. U.S. Geological Survey Open-File Report 2012–1241.
- Lanata F. (2008). Statistical Algorithms for Damage Detection using Static and Dynamic Approaches. *Atti della 4th European Workshop on Structural Health Monitoring*, pp. 1047-1054, Cracow, Poland.

-
- Magalhaes F., Cunha A., Caetano E. (2009). Online automatic identification of the modal parameters of a long span arch bridge. *Mechanical System Signal Processing*. 23: 316-329.
 - Magliulo G., Pentangelo V., Maddaloni G., Capozzi V., Petrone C., Lopez P., (2012). Shake table tests for seismic assessment of suspended continuous ceilings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(6):1819-32.
 - McIntosh J.K., Jacques C., Mitrani-Reiser J., Kirsch T.D., Giovinazzi S., Wilson T.M. (2012). The Impact of the 22nd February 2011 Earthquake on Christchurch. Tesi Università di Canterbury, Nuova Zelanda.
 - Ministero della Salute (2003). Raccomandazioni per il miglioramento della sicurezza sismica e della funzionalità degli ospedali, Roma, Italia.
 - Miranda E. & Taghavi S. (2003). Estimation do seismic demands on acceleration-sensitive nonstructural components in critical facilities, *Atti del Seminar on seismic design, performance, and retrofit of nonstructural component in critical facilities*, ATC 29-2, Newport Beach, CA, 347-360.
 - NTC (2008). Norme tecniche per le costruzioni. D.M. 14.01.2008.
 - Pan American Health Organization (2008). Hospital Safety Index - Guide for Evaluators, Washington, USA.
 - P.C.M.-D.P.C. 01/06/2009. Linee guida per la riduzione della vulnerabilità sismica di elementi non strutturali arredi e impianti.

Bibliografia

- Peeters B. (2000). System identification and damage detection in civil engineering. Tesi di dottorato, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgio.
- Peeters B., Van der Auweraer H., Guillaume P., Leuridan J. (2004). The PolyMAX frequency-domain method: a new standard for modal parameter estimation?. *Shock and Vibration*, 11: 395-409.
- Peeters B. & De Roeck G. (2001). Stochastic system identification for operational modal analysis: a review. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 123: 659-667.
- Perrone D., Leone M., Aiello M.A. (2016). Evaluation of the infill influence on the elastic period of existing RC frames, *Engineering Structures* 123:419-433.
- Rainieri C. & Fabbrocino G. (2015). Development and validation of an automated operational modal analysis algorithm for vibration-based monitoring and tensile load estimation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 60-61, pp. 512-534.
- Rainieri C. (2014). Perspectives of Second-Order Blind Identification for Operational Modal Analysis of Civil Structures, *Shock and Vibration*; Article ID 845106, p. 9.
- Rainieri C. & Fabbrocino G. (2014). *Operational Modal Analysis of civil engineering structures: An Introduction and Guide for Applications*, Springer, New York.

-
- Rainieri C., Fabbrocino G., Cosenza E. (2011). Near real-time tracking of dynamic properties for standalone structural health monitoring systems. *Mechanical System Signal Processing*. 25: 3010-3026.
 - Rainieri C. & Fabbrocino G. (2010). Automated output-only dynamic identification of civil engineering structures. *Mechanical System Signal Processing*. 24: 678-695.
 - Reynders E., Schevenels M., De Roeck G. (2014). MACEC 3.3 a Matlab toolbox for experimental and operational modal analysis. Faculty of Engineering Department of Civil Engineering structural Mechanics Section.
 - Reynders E., Houbrechts J., De Roeck G. (2012). Fully automated (operational) modal analysis. *Mechanical System Signal Processing*. 29: 228-250.
 - Reynders E. & De Roeck G. (2008). Reference-based combined deterministic–stochastic subspace identification for experimental and operational modal analysis. *Mechanical System Signal Processing*. 22: 617-637.
 - Reynders E., Pintelon R., De Roeck G. (2008). Uncertainty bounds on modal parameters obtained from stochastic subspace identification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22 948–969.
 - Ricci P., De Risi M.T., Verderame G.M., Manfredi G. (2013). Influence of infill distribution and design topology on seismic performance of low- and mid-rise RC buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, DOI 10.1007/s 10518-013-9453-4.

Bibliografia

- Rodgers J., Cedillos V., Kumar H., Tobin L.T., Yawitz K. (2009). *Reducing earthquake risk in hospital from equipment, contents, architectural elements and building utility system*. GeoHazards International and GeoHazard Society.
- Rytter A. (1993). *Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structure*. Build Technology and Structural Engineering. Aalborg University, Aalborg, Denmark.
- Schakoff R.J. (1992). *Pattern Recognition: Statistical, Structural and Neural Approaches*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, Sussex
- Scionti M. & Lanslots J.P. (2004). Stabilization diagrams: pole identification using fuzzy clustering techniques. *Advances Engineering Software*, 36: 768-779.
- Silverman B.W. (1986). *Density estimation for statistics and data analysis*. Chapman and Hall Monographs on Statistics and Applied Probability.
- Sohn H., Farrar C., Hemez F. (2004). A Review of Structural Health Monitoring Literature from 1996-2001. Los Alamos National Laboratory Report LA-13976-MS, available online from Los Alamos National Laboratory, <http://library.lanl.gov>.
- Tan P.N., Steinbach M., Kumar V. (2005). *Introduction to Data Mining*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA.
- Ulusoy H.S., Kalkan E., Banga K. (2013). Real-time Seismic Monitoring of Veterans Affairs Hospital Buildings. *Atti della SPIE Smart Structures Conference*, San Diego, CA, Marzo 11-13.

- Van Overschee P. & De Moor B. (1996). *Subspace identification for linear systems: Theory - Implementation - Applications*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Verboven P., Parloo E., Guillaume P., Van Overmeire M. (2002). Autonomous structural health monitoring. Part I: Modal parameter estimation and tracking. *Mechanical System Signal Processing*, 16: 637-657.
- Weijtjens W., De Sitter G., Devriendt C., Guillaume P. (2014). Automated transmissibility based operational modal analysis for continuous monitoring in the presence of harmonics. *Atti della 9th International Conference on Structural Dynamics, EURODDN 2014, Porto, Portugal, 30 June - 2 July 2014*, pp. 2231-2238.
- WHO (World Health Organization)(2004) - NSET - National society for earthquake technology - Nepal, Guidelines for seismic vulnerability assessment of Hospitals, 2004.
- World Health Organization - Regional Office for Europe (2006). *Health facility seismic vulnerability evaluation - a handbook*, Copenhagen, Danimarca.