

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile



Tesi di laurea magistrale

Strategia di miglioramento sismico delle strutture voltate di Pier Luigi Nervi mediante dispositivi a fluido viscoso

Relatore:

prof. Carlo Caldera

Corelatore:

prof. Rosario Ceravolo

Candidata:

Maria Sergio

A.A. 2016-2017

Indice

1	Protezione e conservazione del patrimonio architettonico	1
1.1	Introduzione	1
1.2	Antisismica: stato dell'arte delle norme per la sicurezza degli edifici	2
1.2.1	Prevenzione sismica e pericolosità del territorio	2
1.2.2	Normativa antisismica italiana	3
1.3	Prevenzione sismica: riferimenti normativi	4
1.4	Costruzioni esistenti: NTC 2008 e EC8 a confronto	6
1.4.1	Definizione degli stati limite	6
1.4.2	Conoscenza della struttura	7
1.4.3	Interventi di adeguamento e miglioramento sismici	8
1.5	Patrimonio culturale: LGBC 2007	9
1.5.1	Definizione degli stati limite	9
1.5.2	Conoscenza della costruzione storica	10
1.5.3	Interventi di miglioramento sismico	10
1.6	Conservazione dei beni architettonici: il restauro	11
1.6.1	Carte del restauro: stato dell'arte	12
1.6.2	Conservazione dei beni architettonici del XX secolo	14
2	Sistemi di protezione passiva: i dissipatori	15
2.1	Possibili approcci per l'adeguamento	15
2.2	Sistemi di controllo strutturale	17
2.3	Sistemi di dissipazione dell'energia	19
2.3.1	Dissipatori viscosi	20
2.3.2	Dissipatori viscoelastici	22
2.3.3	Dissipatori ad attrito	25
2.3.4	Dissipatori isteretici metallici	29
2.3.5	Confronto tra i sistemi di dissipazione dell'energia analizzati	29
2.4	Stato dell'arte degli interventi di protezione passiva sui beni culturali	31
2.4.1	Applicazioni	31
3	Caso studio: il salone C del Palazzo delle Esposizioni di Torino	34
3.1	Introduzione	34
3.2	Pier Luigi Nervi, il "costruttore" e l'"architetto"	34
3.2.1	Le invenzioni strutturali	36

3.2.2	La prefabbricazione strutturale	38
3.3	Palazzo delle Esposizioni di Torino	39
3.3.1	Salone B	40
3.3.2	Salone C	41
3.4	Modellazione del Salone C	42
3.4.1	Modello geometrico	42
3.4.2	Modello agli elementi finiti	43
3.4.3	Analisi statica	46
3.4.4	Analisi modale	49
4	Applicazione al caso studio dei dispositivi a fluido viscoso	51
4.1	Proposta di miglioramento sismico	51
4.1.1	Progetto dei dissipatori viscosi	51
4.1.2	Modellazione dei dissipatori viscosi	53
4.1.3	Posizionamento dei dissipatori viscosi	54
4.1.4	Analisi dinamica di tipo time-history	55
4.1.5	Confronto dei dati progettuali dei dispositivi a fluido viscoso con i prodotti commerciali	60
4.1.6	Proposta di inserimento dei dispositivi a fluido viscoso	61
4.2	Conclusioni	62
	Bibliografia	65
	Normativa	68
	Sitografia	69
	Allegati	70
	Listato ANSYS per la creazione del modello FEM	70
	Listato ANSYS per la creazione del modello FEM con dissipatori	76
	Risultati analisi modale	79
	Modi significativi	81

Capitolo 1

Protezione e conservazione del patrimonio architettonico

1.1 Introduzione

La conservazione del patrimonio architettonico e storico contro i disastri naturali, come ad esempio il sisma, è un argomento molto attuale in Europa. In particolare in Italia, sono stati numerosi i recenti casi di eventi sismici che hanno riportato ingenti perdite di vite umane e notevoli danni al patrimonio culturale dei luoghi colpiti (Umbria-Marche 1997-1998; Abruzzo 2009; Emilia Romagna 2012; Marche-Lazio-Umbria 2016).¹

I terremoti di media-elevata intensità che si sono susseguiti negli ultimi decenni hanno quindi mostrato un'elevata vulnerabilità sismica sia del patrimonio edilizio convenzionale che di quello a carattere storico, artistico e monumentale. I danni riportati alle parti strutturali e non strutturali, o addirittura il collasso, sono di entità tale da rendere gli edifici inagibili o non utilizzabili a meno di interventi di riparazione. Tale condizione deriva da diversi fattori:

- l' utilizzo di normative obsolete nelle quali c'è l'assenza di specifiche direttive sismiche;
- il rispetto di obiettivi prestazionali basati sul danneggiamento strutturale, seppur controllato, in caso di sisma;
- l'età della costruzione e gli standard di manutenzione;
- l'uso dell'edificio con differenti funzioni rispetto a quelle originarie senza una nuova valutazione dell'attuale vulnerabilità;

¹F. Clementi, V. Gazzani, M. Poiani and S. Lenci, ASSESSMENT OF SEISMIC BEHAVIOUR OF HERITAGE MASONRY BUILDINGS USING NUMERICAL MODELLING, Journal of Building Engineering, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobee.2016.09.005>

i quali hanno reso la situazione economicamente insostenibile in un paese come l'Italia, contraddistinto da una sismicità alta e da un'elevata vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio.²

1.2 Antisismica: stato dell'arte delle norme per la sicurezza degli edifici

Il rischio sismico dell'Italia è uno dei più elevati in Europa, per la sua particolare posizione geografica nel bacino del Mediterraneo, tra la zolla africana e quella eurasiatica. Gli eventi sismici degli ultimi anni hanno avuto conseguenze piuttosto rilevanti, non tanto per l'elevata intensità del sisma, ma per l'inadeguatezza delle strutture.

Di seguito si riportano la classificazione delle zone sismiche sul territorio italiano e la normativa italiana di prevenzione del rischio sismico.

1.2.1 Prevenzione sismica e pericolosità del territorio

Per ridurre gli effetti del terremoto, è stata necessaria una adeguata classificazione del territorio nazionale, al quale erano state assegnate tre categorie sismiche a diversa severità. Successivamente, basandosi sugli studi e le elaborazioni più recenti relative alla pericolosità sismica del territorio, è stata pubblicata l' Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003, sulla Gazzetta Ufficiale n. 105 del 08/05/03, il cui provvedimento riclassifica l'intero territorio in quattro zone a diversa pericolosità, eliminando le zone non classificate:³

- Zona 1: è la più pericolosa, quindi possono verificarsi fortissimi terremoti;
- Zona 2: possono verificarsi forti terremoti;
- Zona 3: possono verificarsi forti terremoti ma rari;
- Zona 4: è la zona meno pericolosa, quindi i terremoti sono rari.

Nel 2004 l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ha fornito una mappa che fornisce il quadro delle aree più pericolose in Italia, resa ufficiale con l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28 aprile 2006, sulla Gazzetta Ufficiale n. 108 del 11/05/06. La mappa di pericolosità sismica è espressa in termini di accelerazione orizzontale del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. Gli intervalli di accelerazione sono definiti per le quattro zone sismiche del territorio nazionale.

²F.C. Ponzio, A. Di Cesare, D. Nigro, TECNICHE INNOVATIVE DI ADEGUAMENTO SISMICO DI EDIFICI ESISTENTI - Recenti indagini sperimentali condotte dall'Università degli Studi della Basilicata.

³<http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/classificazione.wp>

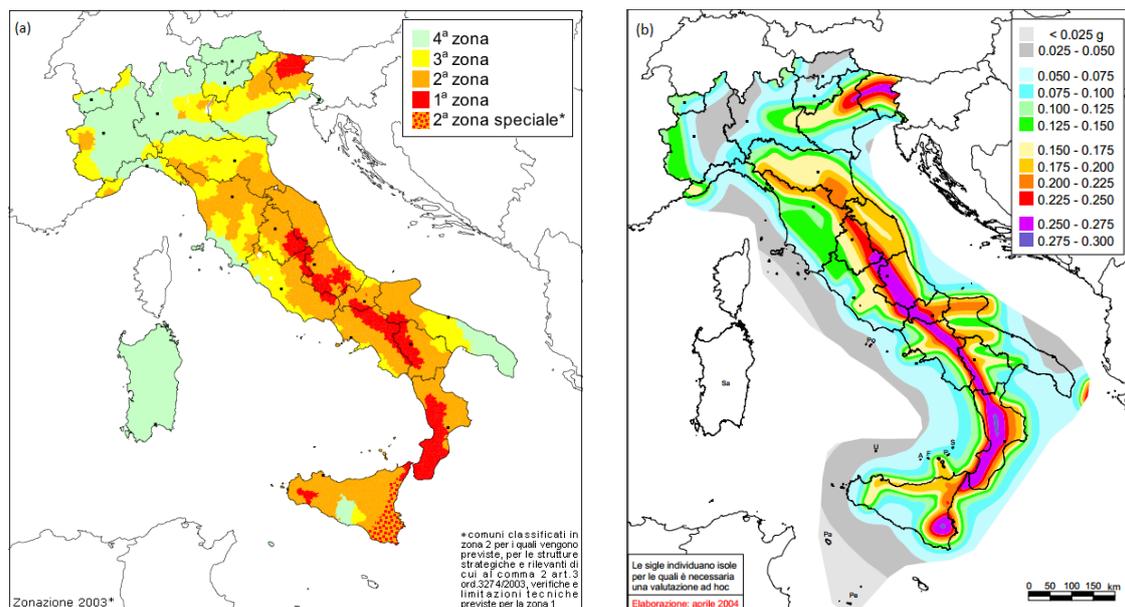


Figura 1.1: *Classificazione del territorio italiano: (a) zone sismiche del territorio italiano; (b) mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale (fonte: <http://zonesismiche.mi.ingv.it/>).*

1.2.2 Normativa antisismica italiana

Un altro aspetto regolatore della prevenzione sismica è una adeguata normativa che impone misure preventive alle strutture in base al rischio sismico dei luoghi. Dal 1908 al 1974 i Comuni italiani sono stati classificati come sismici e sottoposti a norme restrittive dopo essere stati danneggiati dai terremoti.

Di seguito è riportato un elenco delle normative antisismiche in Italia che mette in risalto l'evoluzione delle stesse negli ultimi anni:⁴

- Legge 1086/1971 "Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso, ed a struttura metallica";
- Legge 64/1974 "Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le norme sismiche";
- Riclassificazione del territorio nazionale in tre categorie sismiche predisposta dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) nel 1981: è grazie ai decreti ministeriali successivi che il 45% del territorio nazionale fu classificato e soggetto all'obbligo di rispettare specifiche norme per le costruzioni;

⁴http://www.edilportale.com/news/2016/08/focus/antisismica-lo-stato-dell-arte-delle-norme-per-la-sicurezza-degli-edifici_53512_67.html

- Ordinanza PCM 3274/2003 che riclassifica il territorio nazionale in quattro zone di pericolosità: introducendo la zona 4, si eliminano definitivamente le zone non classificate rendendo, di fatto, tutta l'Italia interessata dal problema sismico;
- Norme tecniche per le costruzioni (NTC 2008) che definiscono i principi per il progetto, l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni, nei riguardi dei requisiti richiesti in termini di resistenza meccanica, stabilità e di durabilità; con le NTC 2008 si toglie la libertà regionale di disporre in merito all'obbligo di progettazione antisismica nella zona 4, rendendo necessaria la redazione di progetti che includano l'effetto sismico.

Il testo unico in materia di edilizia, le precedentemente nominate NTC 2008, è in revisione. Il 6 febbraio 2017 è stato inviato il documento aggiornato con la bozza delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni alla Commissione Europea e resterà al vaglio fino all'8 maggio 2017. Quindi, molto probabilmente le nuove NTC saranno in vigore entro la prima metà del 2017, che sostituiranno le precedenti approvate con il D.M. del 14 gennaio 2008.⁵

Nelle nuove Norme, si affronterà nuovamente il tema degli edifici esistenti: i criteri saranno diversi per l'esistente rispetto al nuovo. Questa differenza è dovuta alla necessità di applicare dei criteri meno stringenti all'esistente per evitare che gli obblighi siano troppo onerosi o materialmente inapplicabili.

1.3 Prevenzione sismica: riferimenti normativi

La prevenzione sismica si può realizzare oltre che utilizzando lo strumento della classificazione sismica, anche con l'applicazione della normativa antisismica. Di seguito si affronterà il delicato problema delle costruzioni esistenti e del patrimonio monumentale italiano facente parte di una particolare classe di costruzioni, confrontando diversi aspetti presenti nelle normative. Si definisce:

- edificio di nuova costruzione: una costruzione che nasce da un intervento di trasformazione edilizia e urbanistica del territorio non rientrante nelle categorie di interventi di manutenzione, restauro e ristrutturazione;⁶
- opera esistente: una costruzione che abbia, alla data della redazione della valutazione di sicurezza e/o progetto di intervento, la struttura completamente realizzata;⁷
- bene culturale: le cose immobili e mobili che presentano interesse artistico, storico, archeologico, etnoantropologico, archivistico e bibliografico e le altre cose individuate dalla legge o in base alla legge quali testimonianze aventi valore di civiltà; tali beni

⁵<http://biblus.acca.it/ntc-2017-testo-al-vaglio-della-commissione-europea/>

⁶D.P.R. 6 giugno 2001, n. 380 Testo unico in materia di edilizia, art. 3

⁷NTC 2008, paragrafo §8.1

sono soggetti alla tutela al fine di garantirne la protezione e la conservazione per fini di pubblica fruizione.⁸

I criteri per la valutazione del comportamento sismico delle strutture esistenti sono definiti, a livello nazionale, nel capitolo 8 "Costruzioni esistenti" delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008) e, a livello internazionale, nell' Eurocodice 8 "Progettazione delle strutture per la resistenza sismica" - parte 3 "Valutazione e adeguamento degli edifici" (EC8-3).

Entrambe le norme citate rimandano a differenti tipi di approcci per gli edifici storici-monumentali; in particolare le NTC 2008 rimandano, per il patrimonio monumentale italiano in muratura, alle "Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale" (LGBC 2007). Tale norma è riferita ai soli beni vincolati in muratura, ma può estendersi a tutto il costruito di valore storico-artistico, nell'ottica di un miglioramento sismico di tali beni.⁹

Si riporta a titolo informativo la normativa antisismica americana riguardante gli edifici esistenti promossa da ASCE (American Society of Civil Engineering), che fornisce le linee guida tecniche per la promozione della sicurezza, affidabilità, produttività ed efficienza in ingegneria civile. Le due norme specifiche in materia antisismica sono:

- ASCE 31 "Seismic Evaluation of Existing Buildings" che descrive un sistema di tre livelli per la valutazione sismica degli edifici esistenti e il livello prestazionale di occupazione;
- ASCE 41 "Seismic Rehabilitation of Existing Buildings" che descrive le innovative tecniche di riabilitazione sismica volte a migliorare le prestazioni degli edifici in terremoti futuri.¹⁰

Per definire il tipo di intervento necessario a migliorare il comportamento di un edificio esistente in caso di sisma, la normativa propone il seguente iter:

- definizione dell'obiettivo dell'intervento mediante una classe di riabilitazione (basilare, di miglioramento, limitato);
- conoscenza dell'edificio in esame (materiali, sezioni, ecc.) tramite i documenti esistenti del progetto o, se possibile, tramite rilievi e test su materiali;
- modellazione e scelta del tipo di analisi da effettuare sul modello (statica o dinamica, lineare o non lineare, ecc.);

⁸D. Lgs. 22 gennaio 2004, n. 42 Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'art. 10 della legge 6 luglio 200, n. 137

⁹L. De Stefani, *TECNICHE INNOVATIVE PER IL MIGLIORAMENTO SISMICO DI EDIFICI STORICO-MONUMENTALI*, relatore prof. R. Scotta, Dottorato di ricerca in scienze dell'ingegneria civile ed ambientale, XXIV ciclo, Università degli studi di Padova, 2012.

¹⁰G.R. Searer, T. F. Paret, S. A. Freeman - Wiss, Janney, Elstner Associates, Inc. - ASCE-31 and ASCE-41: What Good Are They?

- valutazione dei risultati ottenuti;
- valutazione delle opzioni di riabilitazione possibili e scelta della più adeguata.

Nei paragrafi successivi sono prese in considerazione in maniera sintetica le indicazioni definite dalle NTC 2008 e dall'EC8-3 per quanto riguarda gli edifici esistenti e quelle fornite dalle LGBC 2007 in merito al patrimonio culturale degli edifici storico-monumentali in muratura, che sono maggiormente utili per lo sviluppo dell'argomento oggetto della tesi.

1.4 Costruzioni esistenti: NTC 2008 e EC8 a confronto

Le due normative hanno lo scopo di fornire i criteri per la valutazione del comportamento sismico, di descrivere l'approccio da seguire per decidere quali sono gli interventi necessari e di definire dei criteri per le misure di adeguamento. Entrambe le norme sono applicabili ad edifici esistenti realizzati con i comuni materiali da costruzione (calcestruzzo, acciaio e muratura).

1.4.1 Definizione degli stati limite

La sicurezza e le prestazioni di un'opera devono essere valutate in relazione agli stati limite che si possono verificare durante la vita nominale, poiché superati tali stati limite l'opera non soddisfa più i requisiti per i quali è stata progettata.

A tal proposito sono definiti nell'EC8-3 tre stati limite:

- *stato limite di collasso incipiente (NC): la struttura è fortemente danneggiata, con caratteristiche ridotte di resistenza e rigidezza laterali residue, sebbene gli elementi verticali siano ancora in grado di sostenere i carichi verticali. La maggior parte dei componenti non strutturali sono distrutti. Sono presenti grandi spostamenti di interpiano permanenti. La struttura è vicina al collasso e probabilmente non potrebbe resistere ad un altro evento sismico, anche di modesta intensità. Lo stato limite di NC è caratterizzato in genere da un evento sismico con tempo di ritorno di 2475 anni corrispondente ad una probabilità di superamento del 2% in 50 anni;*
- *stato limite di danno significativo (SD): la struttura è danneggiata in maniera significativa, con ancora qualche caratteristica di resistenza e rigidezza laterali residue, e gli elementi verticali sono in grado di sostenere i carichi verticali. Gli elementi non strutturali sono danneggiati, ma senza espulsione di tramezzi e tamponature. Sono presenti modesti spostamenti di interpiano permanenti. La struttura può sostenere ulteriori scosse sismiche di modesta intensità. In generale non risulta economicamente conveniente la riparazione della struttura. Lo stato limite di SD è caratterizzato in genere da un evento sismico con tempo di ritorno di 475 anni corrispondente ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni;*
- *stato limite di danno limitato (DL): la struttura è solo lievemente danneggiata, con elementi strutturali senza significative escursioni in campo plastico e con caratteristiche di resistenza e di rigidezza non compromesse. Gli elementi non strutturali, come*

*i tramezzi e le tamponature, possono presentare fessurazioni diffuse, ma il danno può essere riparato con modesto impegno economico. Gli spostamenti di interpiano permanenti sono trascurabili. La struttura non necessita di riparazioni. Lo stato limite di danno limitato è caratterizzato in genere da un evento sismico con tempo di ritorno di 225 anni corrispondente ad una probabilità di superamento del 20% in 50 anni.*¹¹

I tre stati limite dell'EC8-3 sono pressoché equivalenti ai seguenti stati limite descritti nel codice nazionale:

- *Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC): a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali. La probabilità di superamento nel periodo di riferimento, cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente, è del 5%;*
- *Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV): a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali. La probabilità di superamento nel periodo di riferimento, cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente, è del 10%;*
- *Stato Limite di Danno (SLD): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature. La probabilità di superamento nel periodo di riferimento, cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente, è del 63%.*¹²

1.4.2 Conoscenza della struttura

Le informazioni per la valutazione della resistenza sismica di strutture esistenti sono reperibili da numerose fonti, quali ad esempio i documenti di progetto dell'edificio analizzato, le indagini sul campo, le misurazioni e le prove in sito e/o in laboratorio. In base alla quantità e la qualità dei dati raccolti, si decidono il tipo di analisi strutturale ammissibile e il valore dei coefficienti di confidenza da adottare. Per questo motivo sono definiti tre livelli di conoscenza: conoscenza limitata (KL1); conoscenza adeguata (KL2); conoscenza accurata (KL3). Gli aspetti che definiscono tale livello di conoscenza sono:

¹¹ EC8-3, paragrafo §2.1

¹² NTC 2008, paragrafo §3.2

- *la geometria: le proprietà geometriche del sistema strutturale e degli elementi non strutturali (come i pannelli di tamponamento in muratura) che possono influire sulla risposta strutturale;*
- *i dettagli: questi includono la quantità e la qualità dei dettagli di armatura negli elementi in calcestruzzo armato, dei collegamenti fra le membrane di acciaio, il collegamento dei diaframmi alle strutture resistenti alle forze laterali, le giunzioni di malta nelle murature e la natura di alcuni elementi di rinforzo nella muratura;*
- *i materiali: le proprietà meccaniche dei materiali costituenti gli elementi strutturali.*¹³

1.4.3 Interventi di adeguamento e miglioramento sismici

Mentre nell'EC8-3 si contemplano soltanto interventi di adeguamento sismico, le NTC 2008 riportano queste tipologie in intervento:

- *interventi di adeguamento atti a conseguire i livelli di sicurezza previsti dalle presenti norme;*
- *interventi di miglioramento atti ad aumentare la sicurezza strutturale esistente, pur senza necessariamente raggiungere i livelli richiesti dalle presenti norme;*
- *riparazioni o interventi locali che interessino elementi isolati, e che comunque comportino un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti.*¹⁴

L'EC8-3 suggerisce i seguenti tipi di interventi di adeguamento:

- *modifica locale o globale degli elementi danneggiati o non danneggiati (riparazione, rinforzo o totale sostituzione), considerando la loro rigidità, resistenza e duttilità;*
- *aggiunta di nuovi elementi strutturali (controventi, tamponamenti, ecc.);*
- *modifica del sistema strutturale (eliminazione di elementi vulnerabili, modifica della disposizione per una maggior regolarità, ecc.);*
- *aggiunta di un nuovo sistema strutturale in grado di sostenere una parte o tutta la sollecitazione sismica;*
- *possibili trasformazioni di elementi non strutturali in elementi strutturali;*
- *introduzione di dispositivi di protezione passiva attraverso elementi di controvento dissipativi o l'isolamento alla base;*
- *riduzione della massa;*

¹³ EC8-3, paragrafo §3.3

¹⁴ NTC 2008, paragrafo §8.4

- *restrizione o cambiamento della destinazione d'uso dell'edificio;*
- *demolizione parziale.*¹⁵

1.5 Patrimonio culturale: LGBC 2007

Per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale tutelato, si fa riferimento alla Direttiva P.C.M. del 12 ottobre 2007 per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni. È necessario avere una direttiva opportunamente adattata alle peculiarità del patrimonio culturale "per il significato culturale e le caratteristiche meccaniche delle strutture, meritando una trattazione propria."¹⁶

1.5.1 Definizione degli stati limite

Per i manufatti architettonici di interesse storico artistico l'acquisizione di un sufficiente livello di sicurezza e protezione nei riguardi del rischio sismico è garantita attraverso il rispetto di tre stati limite:

- sicurezza nei confronti dello stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV): con tale verifica si garantisce non solo l'incolumità delle persone ma la stessa conservazione del manufatto, che potrà essere restaurato a seguito dell'evento;
- sicurezza nei confronti dello stato limite di esercizio di danno (SLD): tale verifica è considerata solo in relazione alla perdita di funzionalità (agibilità) del manufatto;
- sicurezza nei confronti di opere d'arte (SLA): a seguito di un terremoto di livello opportuno (in genere quello preso in considerazione per lo stato limite di danno), i beni artistici contenuti nel manufatto, intesi come apparati decorativi, superfici pittoriche, elementi architettonici di pregio, nonché beni mobili pertinenti (pale d'altare, fonti battesimali, statue, ecc.) subiscono danni di modesta entità, tali da poter essere restaurati senza una significativa perdita del valore culturale.¹⁷

La valutazione nei riguardi dello SLV è richiesta per ciascun manufatto tutelato, anche se non soggetto ad uso; la valutazione nei riguardi dello SLD è richiesta, a livello complessivo, per i manufatti tutelati di cui si vuole sostanzialmente garantire la funzionalità dopo il terremoto, in relazione al loro uso; la valutazione nei riguardi dello SLA è richiesta, esclusivamente a livello locale, nelle parti della costruzione in cui sono presenti elementi di particolare valore storico artistico.

¹⁵ EC8-3, paragrafo §5.3.1

¹⁶ A. Giuffrè, MONUMENTI E TERREMOTI - Aspetti statici del restauro, Multigrafica Editrice, 1988.

¹⁷ Direttiva P.C.M. del 12 ottobre 2007 per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, paragrafo §2.3

1.5.2 Conoscenza della costruzione storica

La fase conoscitiva di una costruzione storica è fondamentale per avere una valutazione della sicurezza sismica attuale e la scelta di un intervento efficace, più che per i comuni edifici esistenti. Il percorso si articola nelle seguenti fasi:

- l'identificazione della costruzione, la sua localizzazione in relazione a particolari aree a rischio, ed il rapporto della stessa con il contesto urbano circostante; l'analisi consiste in un primo rilievo schematico del manufatto;
- il rilievo geometrico della costruzione nello stato attuale, compresi gli eventuali fenomeni fessurativi e deformativi;
- l'individuazione delle fasi di trasformazione edilizia fino alla situazione attuale;
- l'individuazione degli elementi strutturali, sia dal punto di vista dei materiali che gli aspetti costruttivi;
- l'identificazione dei materiali, del loro stato di degrado, delle loro proprietà meccaniche;
- la conoscenza del sottosuolo e delle strutture di fondazione.¹⁸

Le indagini conoscitive dovranno concentrarsi sulla storia del manufatto, sulla geometria dei suoi elementi strutturali, sulle tecniche costruttive e sui fenomeni di degrado. Successivamente, il progettista potrà definire un fattore di confidenza, che consente di verificare l'attendibilità del modello di analisi e di valutare l'indice di sicurezza sismica. Le LGBC 2007 individuano tre livelli per la valutazione della sicurezza sismica, i quali suggeriscono quale metodo di analisi utilizzare: analisi qualitativa e valutazione con modelli meccanici semplificati (LV1); valutazione su singoli macroelementi (LV2); valutazione complessiva della risposta sismica del manufatto (LV3).¹⁹

1.5.3 Interventi di miglioramento sismico

Gli interventi sulle strutture che mirano a ridurre la vulnerabilità sismica, sono da valutarsi nel quadro generale della conservazione della costruzione. Se la zona viene dichiarata a rischio sismico, si deve procedere con l'individuazione dell'intervento. *"Per i beni di interesse culturale in tali zone, ai sensi del comma 4 dell'art. 29 del D.Lgs. 22 gennaio 2004 n. 42 Codice dei beni culturali e del paesaggio, è in ogni caso possibile limitarsi ad interventi di miglioramento effettuando la relativa valutazione della sicurezza".*²⁰ L'obiettivo dell'intervento di miglioramento è la conservazione dell'architettura in tutte le sue

¹⁸Direttiva P.C.M. del 12 ottobre 2007 per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, paragrafo §4.1.1

¹⁹Direttiva P.C.M. del 12 ottobre 2007 per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, paragrafo §5.3

²⁰NTC 2008, paragrafo §8.4

declinazioni, quindi deve essere realizzato dopo aver accertato i benefici che ne conseguono e l'impatto sulla costruzione storica. Si preferiscono sempre interventi che si integrano con la struttura esistente senza trasformarla radicalmente. È importante quindi trovare il giusto equilibrio tra gli obiettivi di sicurezza e durabilità e gli interventi da realizzare in modo da produrre il minimo impatto sul manufatto storico.

La strategia di intervento può appartenere a una delle seguenti categorie generali o a particolari combinazioni di esse:

- *rinforzo di parte o di tutti gli elementi resistenti, al fine di aumentarne selettivamente la resistenza, la rigidità, la duttilità o una combinazione di esse (ponendo sempre estrema attenzione alle modifiche indotte allo schema strutturale);*
- *inserimento di nuovi elementi, compatibili con quelli esistenti, al fine di eliminare la vulnerabilità locale di alcune parti della costruzione e migliorare il funzionamento complessivo in termini di resistenza o duttilità;*
- *introduzione di una protezione passiva mediante strutture di controvento dissipative e/o isolamento alla base (considerando accuratamente tutte le possibili ricadute sulla conservazione, ed in particolare la presenza di substrati archeologici);*
- *riduzione delle masse (con le dovute precauzioni);*
- *limitazione o cambiamento della destinazione d'uso dell'edificio (in questo caso sarà obbligatoria una verifica di compatibilità alle trasformazioni urbanistiche previste nei piani attuativi e nei cambi di destinazione d'uso degli edifici).*

In generale gli interventi differiscono per estensione, invasività, reversibilità, stato di coazione fornito, integrità architettonica, durabilità e compatibilità materiale. Inoltre, dovrà essere rapportato anche al suo costo e all'effettiva utilità.²¹

1.6 Conservazione dei beni architettonici: il restauro

A proposito della consistenza dell'intervento di miglioramento sismico da attuare, è importante ricordare i criteri fondamentali del restauro quali: la riconoscibilità, la reversibilità, la compatibilità, il minimo intervento e l'interdisciplinarietà. In questo modo si cerca di ricondurre il consolidamento e miglioramento sismico degli edifici storici entro l'ambito disciplinare del restauro.²²

²¹EC8-3, paragrafo §6.1

²²L. De Stefani, TECNICHE INNOVATIVE PER IL MIGLIORAMENTO SISMICO DI EDIFICI STORICO-MONUMENTALI, relatore prof. R. Scotta, Dottorato di ricerca in scienze dell'ingegneria civile ed ambientale, XXIV ciclo, Università degli studi di Padova, 2012.

1.6.1 Carte del restauro: stato dell'arte

L'esigenza di tutelare i monumenti dalle distruzioni e alterazioni trovò i suoi primi interpreti alla fine del XVIII secolo nelle persone di William Morris e John Ruskin. Successivamente, iniziò un lungo periodo di dibattito dal quale ne derivò una complessa e graduale elaborazione di principi e prescrizioni, le cosiddette "Carte del restauro".²³

Carta di Atene (1931)

È la prima carta del restauro scritta durante la Conferenza Internazionale degli Architetti riunita ad Atene. Essa propone delle raccomandazioni rivolte ai governi degli Stati, così riassunte:

- curare il proprio patrimonio architettonico;
- uniformare le legislazioni così da non far prelevare l'interesse privato su quello pubblico;
- auspicare un restauro filologico piuttosto che uno stilistico;
- utilizzare materiali moderni per il consolidamento (per esempio il cemento armato).

Carta Italiana del Restauro (1932)

Può essere considerata la prima direttiva ufficiale dello Stato Italiano in materia di restauro. Si affermavano i principi della Carta di Atene, ma intervenendo con un restauro "scientifico", sfruttando cioè tutte le più moderne tecnologie per giungere a tale tipologia di intervento.

Carta di Venezia (1964)

Il problema del restauro fu di nuovo attuale in seguito alle distruzioni causate dalla Seconda Guerra Mondiale e la conseguente ricostruzione del dopoguerra, la quale avvenne ripristinando il preesistente anche a rischio di commettere dei veri falsi storici. Successivamente alla ricostruzione post-bellica, si riunì il Secondo Congresso Internazionale degli Architetti e Tecnici dei Monumenti a Venezia, nel quale si sviluppò la Carta di Venezia. In essa si sottolinea soprattutto l'importanza dell'aspetto storico di un edificio e introduce per la prima volta il concetto di conservazione dell'ambiente urbano che circonda il monumento.

²³R. Strassoldo, LE CARTE DEL RESTAURO. I CRITERI PER GLI INTERVENTI DI RECUPERO DEI BENI ARCHITETTONICI, Forum Edizioni, 2007.

Carta Italiana del Restauro (1972)

Nei dodici articoli, si definiscono gli oggetti interessati da azioni di salvaguardia e restauro: le singole opere d'arte; i complessi di edifici d'interesse monumentale, storico o ambientale; i centri storici; le collezioni artistiche; gli arredamenti; i giardini; i resti antichi in ricerche.

Per "salvaguardia" si intende l'insieme di interventi conservativi attuabili non direttamente sull'opera; per restauro si intende invece "qualsiasi intervento volto a mantenere in efficienza, a facilitare la lettura e a trasmettere al futuro le opere oggetto di tutela".²⁴

Si definiscono gli interventi proibiti per qualsiasi opera d'arte (completamenti in stile, rimozioni o demolizioni che cancellino il passaggio dell'opera nel tempo, rimozioni o ricollocazioni in luoghi diversi dagli originari, alterazioni delle condizioni accessorie) e quelli ammessi (aggiunte per ragioni statiche e reintegrazione di piccole parti storicamente accertate, puliture, nuove sistemazioni di opere quando non esiste più la sistemazione tradizionale).

La Carta ammette l'uso di nuove tecniche e materiali per il restauro e introduce l'interesse nei confronti dei danni arrecati dall'inquinamento atmosferico e dalle condizioni termo-igrometriche.

Carta Europea del Patrimonio Architettonico (Amsterdam, 1975)

Essa riconosce l'architettura singolare dell'Europa quale patrimonio comune di tutti i popoli che la compongono ed afferma l'intenzione degli Stati membri di cooperare fra di loro al fine di proteggerlo. Allo stesso modo, si afferma che il patrimonio architettonico dell'Europa è parte integrante del patrimonio culturale di tutto il mondo. La conservazione, quindi, deve essere considerata come un obiettivo essenziale della pianificazione urbana e dell'assetto territoriale, invece che un problema marginale. Inoltre si pone attenzione ai programmi educativi che devono preoccuparsi di far apprezzare il patrimonio architettonico al pubblico e soprattutto alle generazioni future.

I poteri locali, cui spetta la maggior parte delle decisioni importanti in materia di assetto, sono particolarmente responsabili della protezione del patrimonio architettonico. Inoltre si richiede che le misure legislative e amministrative necessarie siano rafforzate e rese più efficaci.

Carta di Cracovia: Principi per la conservazione e il restauro del patrimonio costruito (2000)

Viene promulgata nell'anno internazionale dell'architettura e si rifà ai contenuti della Carta di Venezia. La grande novità è che si parla di "patrimonio" e non più di "monumento" architettonico. I principi del restauro, quindi, sono da applicare non solo agli edifici più importanti ma agli interi centri storici. L'obiettivo che questa Carta si pone è quello della sensibilizzazione alla conservazione e manutenzione dell'intero territorio, comprese le aree paesaggistiche non costruite, in quanto è l'intero territorio a custodire elementi molto importanti della storia e della cultura umana.

²⁴Carta Italiana del Restauro (1972), Art. 4.

1.6.2 Conservazione dei beni architettonici del XX secolo

Tutta l'architettura del XX secolo, compresa quella del secondo dopoguerra, è considerata nella cultura della conservazione architettonica, ma tale consapevolezza si scontra con l'adeguamento degli edifici esistenti ai regolamenti edilizi in vigore. Le norme vigenti in ambito edilizio sono formulate tenendo poco conto del valore patrimoniale degli edifici, mettendo in secondo piano l'importanza dal punto di vista storico-culturale. La possibilità di derogare alle norme vigenti varia molto spesso all'interno di una stessa nazione, per questo motivo si cerca di superare il livello nazionale in materia di conservazione, sviluppando soluzioni su misura che rispettino le caratteristiche del manufatto.²⁵

Sempre più frequentemente sarà necessario confrontarsi con l'opportunità di riutilizzare edifici che non soddisfano le normative (di sicurezza, di comfort o altro), in quanto materialmente e/o tecnicamente superati. Il recupero di intere aree "dismesse" pone il problema del valore patrimoniale delle stesse. Per questo motivo, qualsiasi intervento di recupero e riuso implica un ampio raggio di conoscenze e competenze. Si inizia con l'inquadramento storico-critico dell'opera e la riorganizzazione funzionale e si procede con il ripristino ed eventualmente il restauro definiti attraverso strategie progettuali appropriate. Si fa notare che l'iter progettuale è inverso rispetto a quello del nuovo, e segue un approccio multidisciplinare in modo da determinarne le caratteristiche principali (durabilità, degrado, distribuzione, spazialità, normativa vigente, ecc.) e dedurne eventuali usi compatibili.

Invece che considerare la salvaguardia come "un'attitudine di difesa, reattiva e sostanzialmente conservatrice", essa concede di pensare e adottare strumenti nuovi e adatti al caso specifico per tener conto delle difficoltà culturali, tecniche e ideologiche alle quali si va incontro.²⁶

²⁵R. Grignolo, DIRITTO E SALVAGUARDIA DELL'ARCHITETTURA DEL XX SECOLO, Mendrisio Academy Press, Editore Silvana, 2014.

²⁶E. Palazzotto, IL RESTAURO DEL MODERNO IN ITALIA E IN EUROPA, Franco Angelini Edizioni.

Capitolo 2

Sistemi di protezione passiva: i dissipatori

2.1 Possibili approcci per l'adeguamento

Il progetto di un intervento di adeguamento sismico può svilupparsi secondo diverse tipologie di approcci. Tra questi, si elencano i seguenti metodi:

- intervento globale, che modifica il sistema strutturale in modo che le richieste di progetto siano minori della capacità degli elementi strutturali e non strutturali;

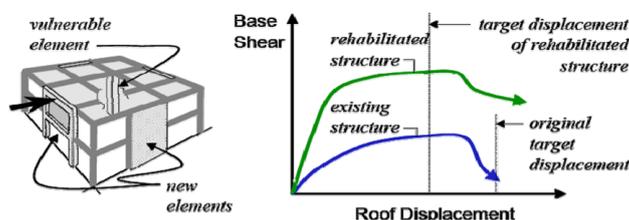


Figura 2.1: Schematizzazione di intervento globale.

- intervento locale, che modifica i componenti del sistema strutturale e non strutturale in maniera isolata in modo da aumentare la capacità di deformazione degli elementi insufficienti;

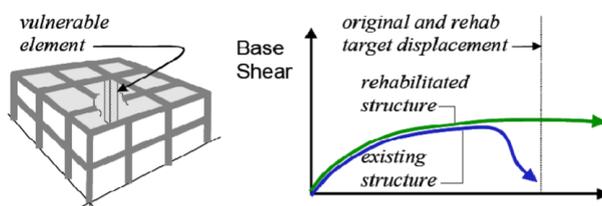


Figura 2.2: Schematizzazione di intervento locale.

- intervento multiplo, ovvero su più parametri contemporaneamente (per esempio la rigidezza, la duttilità, la resistenza);
- riduzione della domanda sismica, ovvero tramite l'utilizzo di sistemi passivi di isolamento;

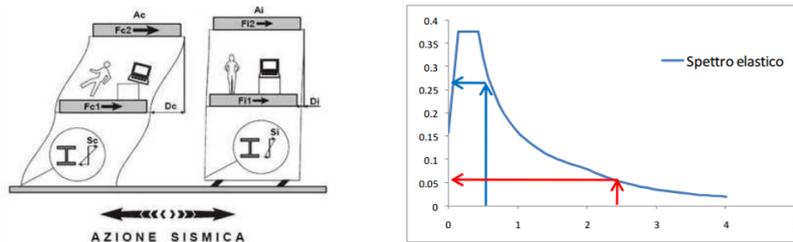


Figura 2.3: Diminuzione della domanda di prestazione: Isolamento sismico.

- miglioramento della capacità strutturale, ovvero tramite l'introduzione di sistemi passivi di dissipazione.¹

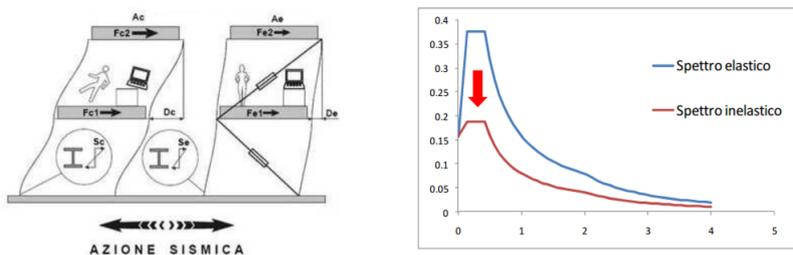


Figura 2.4: Aumento della capacità: Sistemi dissipativi.

Negli ultimi due casi, l'intervento di adeguamento è realizzato tramite l'utilizzo di dispositivi di controllo strutturale passivi. Sia i sistemi di isolamento sismico che di dissipazione dell'energia sono strategie progettuali già utilizzate in diversi lavori di adeguamento sismico. Tali sistemi non sono sempre adeguati, in particolar modo nei casi in cui gli obiettivi di adeguamento non sono elevati. In generale, essi sono utilizzabili nel caso in cui si desideri raggiungere prestazioni antisismiche elevate e si possano affrontare i costi legati alla progettazione e all'installazione di questi sistemi.²

¹W. Salvatore, INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO SISMICO CON SISTEMI DI ISOLAMENTO ALLA BASE O SISTEMI DISSIPATIVI, Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale - Università di Pisa, 2014 (fonte fig. da 2.1 a 2.4).

²FEMA 273-SEISMIC REHABILITATION GUIDELINES, Chapter 9: Seismic Isolation and Energy Dissipation (Systematic Rehabilitation)

2.2 Sistemi di controllo strutturale

I sistemi di controllo possono essere classificati in tre grandi categorie in base al modo in cui rispondono all'azione del sisma:

- sistemi attivi, ovvero quei sistemi dotati della capacità di invertire il processo dinamico mediante apporto di potenze meccaniche esterne in funzione dello stato istantaneo generato dall'insieme delle azioni applicate al sistema, in modo da regolarne più favorevolmente il processo dinamico;
- sistemi passivi, che non necessitano di energia per operare e sono molto affidabili, dato che non sono soggetti ai black-out frequenti in caso di terremoto;
- sistemi ibridi, ovvero l'unione di un sistema di regolazione attivo ad un sistema già dotato di controllo passivo.³

Nel caso di utilizzo di sistemi passivi, opportunamente collocati nella struttura, si modificano le caratteristiche di rigidità e/o capacità della struttura, ottenendo una risposta dinamica più favorevole alle azioni del sisma. I dispositivi vengono dimensionati per funzionare al meglio durante la fase di massima intensità del terremoto di progetto, mantenendo per tutta la vita della costruzione un comportamento costante, come stabilito da progetto.

Nell'ambito del controllo passivo ricadono i sistemi di *isolamento sismico alla base* e di *dissipazione dell'energia*.

Per quanto riguarda l'isolamento sismico, esso interviene riducendo la deformazione dell'edificio, concentrando la domanda di spostamento all'interno del sistema stesso interposto tra il terreno e la struttura isolata.

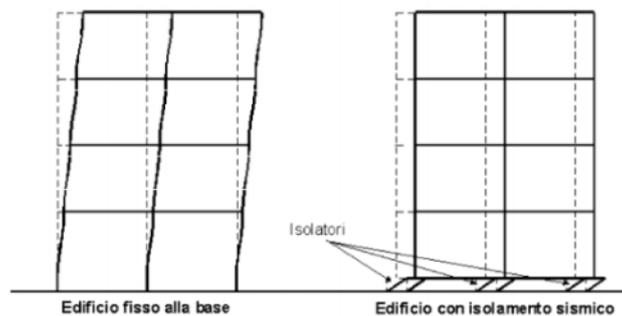


Figura 2.5: *Comportamento dinamico di edificio a base fissa e isolato alla base (fonte: COSTRUZIONI.net).*

³<https://strutturisti.wordpress.com/2009/06/07/tipologie-di-difesa-dalle-azioni-sismiche-controllo-attivo-semi-attivo-passivo-ibrido/>

Gli obiettivi del sistema di isolamento sono quelli di disaccoppiare il moto della struttura da quello del terreno e di limitare al minimo i danni di sovrastruttura e fondazioni. Essi permettono di dissipare l'energia sismica in ingresso e l'auto-ricentraggio della struttura.

Tra gli isolatori si citano quelli elastomerici rinforzati con lamine d'acciaio (LRB), con nucleo in piombo (Lead-LRB), ad elevato smorzamento (HDRB) e quelli a pendolo ad attrito (FPS).

Nel caso di protezione passiva mediante dissipazione, la struttura è in grado di dissipare una consistente parte di energia indotta dal terremoto senza il raggiungimento del danneggiamento degli elementi strutturali e dei componenti non strutturali.

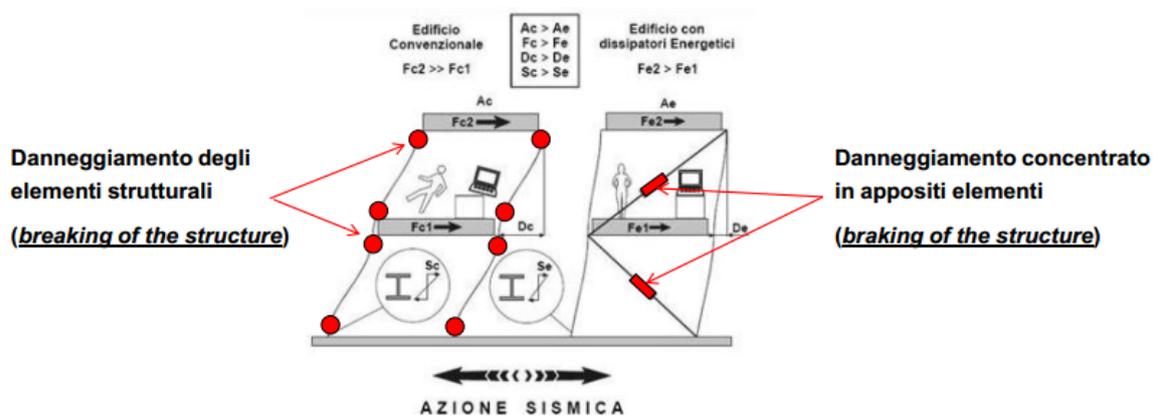


Figura 2.6: Comportamento dinamico di edificio convenzionale e con dissipatori.

Gli obiettivi principali dei sistemi passivi dissipativi sono quelli di limitare le deformazioni negli elementi strutturali e di migliorare lo smorzamento, la rigidità e la resistenza della struttura.

I principali tipi di smorzatori attraverso i quali è possibile migliorare la dissipazione di energia sono i seguenti:

- dissipatori viscosi (Viscous Dampers);
- dissipatori viscoelastici (Viscoelastic Dampers);
- dissipatori ad attrito (Friction Dampers);
- dissipatori isteretici metallici (Yielding Dampers).⁴

⁴W. Salvatore, DISPOSITIVI STRUTTURALI ANTISISMICI, Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale - Università di Pisa, 2014 (fonte fig. 2.6).

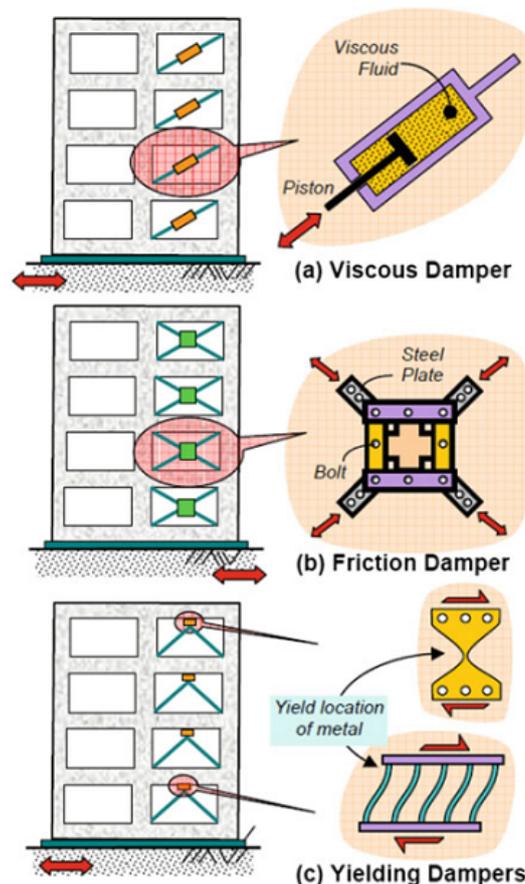


Figura 2.7: Esempi di sistemi di dissipazione dell'energia (fonte:<https://www.quora.com/How-do-earthquake-resistant-buildings-work>).

2.3 Sistemi di dissipazione dell'energia

Originariamente utilizzati nell'industria automobilistica per diminuire la risposta dinamica e il carico di fatica dei veicoli, a partire dagli anni '90 sono stati riconosciuti come una tecnica efficace per migliorare la risposta dinamica degli edifici sottoposti a sisma, poiché sono in grado di ridurre la risposta sismica fino al 60%.⁵

La crescita dell'applicazione e dello sviluppo dei dissipatori di energia ha spinto verso la produzione di dettagliate pubblicazioni sui principi della modellazione di tali dispositivi e sull'analisi di strutture in cui sono installati dei dissipatori (Soong and Dargush 1997; Constantinou et al. 1998; Hanson and Soong 2001). Nonostante l'utilizzo di tali dispositivi sia relativamente recente, la letteratura in merito all'argomento è molto sviluppata.

⁵M.D. Symans, F.A. Chamey, A.S. Whittaker, M.C. Constantinou, C.A. Kircher, M.W. Johnson, R.J. McNamara, ENERGY DISSIPATION SYSTEMS FOR SEISMIC APPLICATIONS: CURRENT PRACTICE AND RECENT DEVELOPMENTS.

I dispositivi a dissipazione di energia sono classificati in due categorie: "dipendente dallo spostamento" e "dipendente dalla velocità".

I primi si definiscono tali in quanto la risposta ciclica è indipendente dalla velocità relativa tra le due estremità del dispositivo e dalla frequenza di eccitazione e quindi il legame forza-spostamento dipende dallo spostamento relativo tra le due estremità del dispositivo; fanno parte di questa categoria i dissipatori ad attrito e isteretici metallici.

I secondi, invece, sono caratterizzati dalla dipendenza della risposta ciclica dalla velocità relativa tra le due estremità del dispositivo e dalla frequenza di eccitazione; esempi di questa categoria sono i dissipatori viscosi e viscoelastici.⁶

Nel presente lavoro, si analizzeranno dettagliatamente le tipologie di dissipatori sopra riportate, valutandone i vantaggi e gli svantaggi dell'applicazione alle strutture.

2.3.1 Dissipatori viscosi

Sono uno dei sistemi di dissipazione più utilizzati per migliorare la risposta dinamica della struttura.

Un dissipatore viscoso è costituito da un cilindro cavo riempito con del fluido (solitamente a base di silicone). Questi sistemi di dissipazione assorbono energia tramite la fuoriuscita del fluido attraverso delle aperture, spinto dal pistone in acciaio inossidabile quando viene azionato.

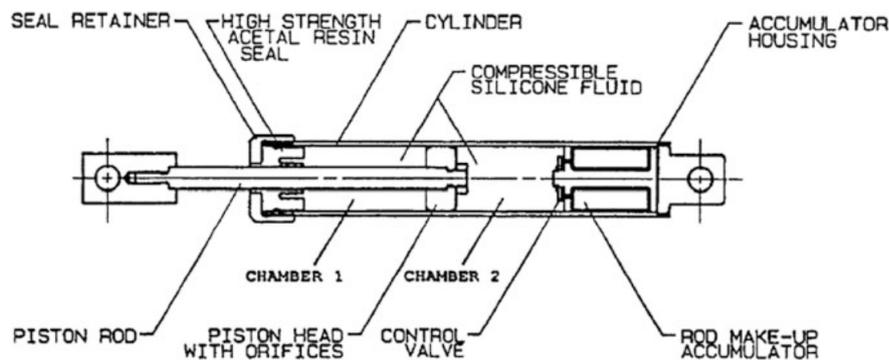


Figura 2.8: Schema di un dissipatore viscoso della Taylor Devices (fonte: *BUILDINGS: DESIGN FOR DAMPING*, Taylor Devices Inc.).

Il flusso attraverso le aperture avviene ad alta velocità ed è compensato da un termostato passivo bi-metallico che permette il funzionamento del dispositivo in un ampio intervallo di temperatura (da -40 a 70° C). La forza nello stesso è generata da una differenza di pressione attraverso la testa del pistone, la quale genera calore che viene irradiato all'esterno, dissipando così energia. Poiché il fluido è comprimibile, il suo volume può essere ridotto dal prodotto della corsa per l'area della barra del pistone, che genera una forza

⁶FEMA 356 - PRESTANDARD AND COMMENTARY FOR SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS, November 2000 - Punto 9.3.3

di ripristino impedita dall'accumulatore. La forza di smorzamento può essere calcolato come:

$$F_d = c \cdot |\nu|^\alpha \operatorname{sgn}(\nu) \quad (2.1)$$

dove c è la costante di smorzamento; ν è la velocità del pistone; $\operatorname{sgn}(\cdot)$ è il segno della funzione; α è l'esponente della velocità, funzione della progettazione dell'estremità aperta del pistone, ottenuto sperimentalmente con valori compresi tra 0.3 e 2.0.

Un valore di α minore di 2.0 può essere ottenuto attraverso delle forme particolari dei fori in modo tale da alterare le caratteristiche del flusso con la velocità del fluido. In base alle richieste di progetto, la forza di smorzamento del dispositivo può avere una relazione lineare o non lineare con la velocità del pistone. Per ottenere una risposta ottimale del sisma, è richiesto normalmente che α sia pari a 1 perché in questa condizione il dispositivo viscoso può sviluppare delle forze di smorzamento eccessive nelle strutture con lunghi periodi di vibrazioni soggette a movimenti del terreno intensi, che inducono grandi velocità alla struttura. Per il caso lineare ($\alpha = 1$), la curva forza-spostamento è di tipo ellittico e la risposta del dispositivo viscoso è fuori fase (90°) rispetto alla risposta della struttura. Quindi, lo smorzatore genera una forza nulla sulla struttura quando si raggiunge lo spostamento massimo, mentre riporta una forza massima alla struttura quando essa ha uno spostamento pari a zero. Se α è vicino a zero, la curva forza-spostamento è di tipo rettangolare.

L'energia dissipata per ogni ciclo può essere calcolata integrando l'equazione precedente rispetto allo spostamento:

$$E_d = 4F_0 u_0 2^\alpha \left[\frac{\Gamma^2(1 + \alpha/2)}{\Gamma(2 + \alpha)} \right] = \lambda F_0 u_0 \quad (2.2)$$

dove F_0 è la forza di picco del dispositivo viscoso; u_0 è lo spostamento di picco attraverso il dispositivo; Γ è la funzione gamma; λ è un parametro il cui valore dipende esclusivamente dall'esponente di velocità α .

Per un valore di forza dato e un'ampiezza di spostamento, l'energia dissipata per ciascun ciclo nel caso di fluido non lineare è più grande, di un fattore λ/π , rispetto al caso lineare e aumenta in modo monotono, con una diminuzione dell'esponente di velocità α (fino al limite teorico di $4/\pi \approx 1.27$, il quale corrisponde al valore di α pari a zero).

Quando un dissipatore viscoso si muove ad una data frequenza ω , e una ampiezza di spostamento u_0 , per dissipare la stessa energia ad ogni ciclo, il coefficiente di smorzamento del dissipatore non lineare c_{nl} è più grande di quello lineare c_l :

$$c_{nl} = c_l \frac{\pi}{\lambda} (\omega u_0)^{1-\alpha} \quad (2.3)$$

Vantaggi e svantaggi dei dissipatori viscosi

I vantaggi possono essere riassunti come segue:

1. non altera la rigidità e il periodo della struttura, perché non contribuisce in alcun modo alla rigidità della struttura primaria. Quindi, questa tipologia di dispositivo è consigliabile per le modifiche su infrastrutture esistenti. Comunque, il mancato cambiamento del periodo può causare occasionalmente una risonanza della struttura, che dovrebbe essere giustificato nel progetto del dispositivo viscoso;
2. può incrementare lo smorzamento del 20-50% rispetto al valore critico senza indurre l'aumento localizzato di rigidità. Quindi questo permette alla struttura di ridurre la risposta in termini di deformazione e tensione, restando nel campo elastico durante forti terremoti;
3. decrementa tensione e deformazione della struttura contemporaneamente: questo dipende dal fatto che la risposta del dispositivo è sfasato di 90° rispetto a quella della struttura primaria;
4. progetto collaudato, in quanto è stato utilizzato con successo già in numerosi progetti di ingegneria;
5. è di dimensioni ridotte, compatto e facile da installare;
6. può avere una durata ed efficacia superiore a 100 anni anche con costi di manutenzione bassi o quasi nulli;
7. non impedisce alla struttura di tornare alla sua posizione originale dopo il terremoto;
8. è insensibile ai cambiamenti di temperatura.

Lo svantaggio principale è legato al fatto che anche piccoli movimenti nella struttura possono causare l'usura delle guarnizioni e la conseguente fuoriuscita del fluido presente all'interno dei dispositivi viscosi. Quindi, è difficile mantenere le guarnizioni intatte per tutta la durata di una struttura.⁷

2.3.2 Dissipatori viscoelastici

Questa tipologia di dissipatori è stata una delle prime applicate alle strutture ingegneristiche per migliorare la risposta dinamica sulla struttura. Sono formati da due strati viscoelastici (polimeri) legati tra tre superfici rigide parallele. Il comportamento smorzante è controllato attraverso l'azione di taglio degli strati viscoelastici.

Il comportamento è tra quello di un dispositivo viscoso precedentemente analizzato e di una molla elastica; tornano alla loro forma iniziale dopo ogni ciclo di deformazione e dissipano energia sotto forma di calore. Dalla curva forza-spostamento si deduce che la forza è in fase con lo spostamento.

⁷Junbo Jia, MODERN EARTHQUAKE ENGINEERING - Offshore and Land-based Structures, Springer, 2017.

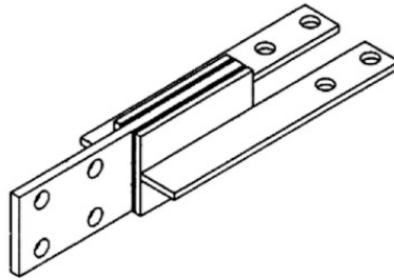


Figura 2.9: Esempio di dissipatore viscoelastico.

Sotto input sismici alti, il comportamento della molla elastica è quello dominante. Questi dispositivi non solo aggiungono dello smorzamento alla struttura primaria, ma contribuiscono anche all'incremento della rigidità e quindi alterano la frequenza della struttura stessa.

Attraverso test sperimentali fatti da Aiken e Kelly, si è dimostrato che la prestazione dei dispositivi viscoelastici misurata con la riduzione di drift interpiano è leggermente migliore di quella dei dispositivi ad attrito. Il rapporto del drift interpiano tra una struttura con dispositivi di questo tipo e una struttura tradizionale varia tra 0.5 e 0.9. In ogni caso, visto che il contributo dei dispositivi alla rigidità è limitato, le forze di taglio alla base delle due strutture sono quasi le stesse.

A causa dello sviluppo di sforzi di trazione nel dispositivo, si riscontrano diverse rotture per delaminazione. Per prevenirla, possono essere utilizzati dei bulloni per bloccare il dispositivo.

Il materiale degli strati viscoelastici presenta solitamente un comportamento viscoelastico solido con entrambi i moduli (Storage e Loss) essendo dipendente dalla frequenza, dalla temperatura come dal livello dello sforzo di taglio: con un incremento di temperatura o dello sforzo di taglio, sia il modulo Storage che quello Loss diminuiscono. Entrambi i moduli aumentano con un aumento della frequenza. Gli esperimenti hanno mostrato anche che le proprietà del dispositivo restano più o meno costanti quando il livello di sforzo si mantiene sotto il 20% per temperatura e frequenza date.

Tra gli effetti nominati finora, la temperatura è quello maggiormente utilizzato per il progetto di dispositivi viscoelastici. Uno dei maggiori problemi può essere, infatti, il seguente: un incremento inaccettabile della forza a basse temperature insieme ad un sovraccarico dell'agente legante usato per incollare il materiale viscoelastico con il suo attacco metallico. Poiché tali dispositivi non si attivano superata una certa soglia del livello della forza applicata, dissipano energia per qualsiasi livello di terremoto. Per questo motivo sono utili anche per dissipare energia indotta dal vento.

Progettazione dei dissipatori viscoelastici

Il dissipatore viscoelastico ha sia proprietà elastiche che viscose. Quando è soggetto ad un carico ciclico sinusoidale con una frequenza pari a Ω , lo sforzo di taglio $\tau(t)$ generata tra gli strati viscoelastici in termini di deformazione di picco di taglio γ_0 e di tensione di picco di taglio τ_0 può essere espresso come:

$$\tau(t) = [G'(\Omega) \sin \Omega t + G''(\Omega) \cos \Omega t] \gamma_0 \quad (2.4)$$

dove $G'(\Omega) = \tau_0 \cos \varphi/\gamma_0$; $G''(\Omega) = \tau_0 \sin \varphi/\gamma_0$; φ è l'angolo di fase tra sforzo e deformazione di taglio.

L'equazione sopra riportata può essere espressa come la somma della componente di rigidità elastica in fase in termini di $G'(\Omega)$, e la componente di smorzamento fuori fase in termini di $G''(\Omega)$:

$$\tau(t) = G'(\Omega)\gamma(t) \pm G''(\Omega) [\gamma_0^2 - \gamma(t)^2]^{1/2} \quad (2.5)$$

Questa equazione mostra come il dissipatore viscoelastico lavora in parte come una molla elastica e in parte con un comportamento viscoso, descrivendo una relazione sforzo-deformazione di tipo ellittica. In ogni ciclo di carico, l'energia dissipata per unità di volume dal dispositivo è pari all'area sviluppata dall'ellisse.

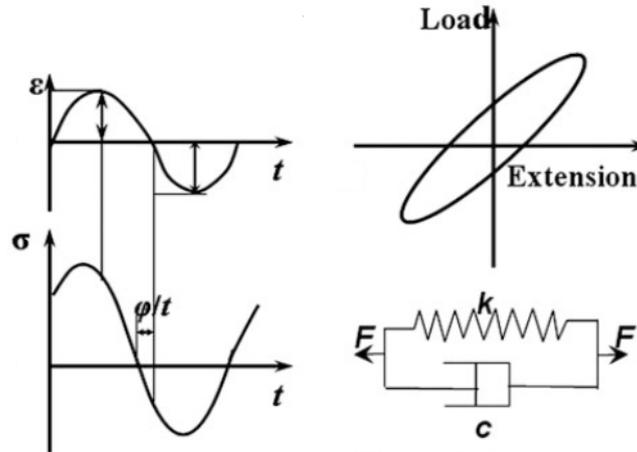


Figura 2.10: *Comportamento viscoelastico.*

L'equazione (2.5) può essere riscritta come:

$$\tau(t) = G'(\Omega)\gamma(t) + \frac{G''(\Omega)}{\Omega} \dot{\gamma}(t) \quad (2.6)$$

dove il punto sul simbolo γ indica che è derivato rispetto al tempo. La parte smorzante può essere calcolata come segue:

$$\xi = \frac{G''(\Omega)}{\Omega} \left(\frac{\Omega}{2G'(\Omega)} \right) = \frac{G''(\Omega)}{2G'(\Omega)} \quad (2.7)$$

dove $G'(\Omega)$ e $G''(\Omega)$ sono riferiti rispettivamente ai moduli di taglio di Storage e Loss, i quali sono funzione delle frequenza di eccitazione, della deformazione di taglio, delle temperature dell'ambiente e del materiale. Essi aumentano con l'aumento della frequenza di eccitazione e diminuiscono con l'aumentare della temperatura.⁸

Vantaggi e svantaggi dei dissipatori viscoelastici

I vantaggi si riassumono nei seguenti punti:

1. si attivano con spostamenti piccoli;
2. producono una forza di ripristino, quindi la struttura ritorna nella sua posizione originale dopo il terremoto;
3. il comportamento lineare permette una modellazione semplificata di tali dissipatori.

Gli svantaggi sono i seguenti:

1. hanno una limitata capacità di deformazione;
2. hanno proprietà dipendenti dalla frequenza e dalla temperatura;
3. la possibilità di distacco e lacerazione del materiale viscoelastica è frequente.⁹

2.3.3 Dissipatori ad attrito

Uno dei metodi più efficace, affidabile ed economico di dissipare energia è il freno ad attrito. Tale principio, alla fine degli anni '70, ha ispirato lo sviluppo dei dissipatori ad attrito. Tali dispositivi assorbono energia dall'attrito prodotto dallo scorrimento di superfici l'una contro l'altra. Le piastre sono bloccate insieme mediante bulloni in acciaio ad alta resistenza. Iniziano a dissipare energia quando la forza di attrito esercitata all'interfaccia tra due superfici supera la forza di attrito limite.

Lo smorzamento indotto da questo tipo di dispositivo è indipendente dalla velocità di carico e dalla temperatura ambiente. Un'altra caratteristica è che il periodo della struttura con dissipatori ad attrito varia con l'ampiezza della vibrazione, quindi si evita il fenomeno della risonanza. Dopo il terremoto, l'edificio torna al suo allineamento originale sotto l'azione della molla di una struttura elastica.

I dissipatori ad attrito sono progettati per non scivolare sotto l'azione del vento.¹⁰

⁸Junbo Jia, MODERN EARTHQUAKE ENGINEERING - Offshore and Land-based Structures, Springer, 2017 (fonte fig. 2.9 - 2.10).

⁹M.D. Symans, F.A. Charmey, A.S. Whittaker, M.C. Constantinou, C.A. Kircher, M.W. Johnson, R.J. McNamara, ENERGY DISSIPATION SYSTEMS FOR SEISMIC APPLICATIONS: CURRENT PRACTICE AND RECENT DEVELOPMENTS.

¹⁰C. Pasquin, N. Leboeuf, R.T. Pall, A. Pall, FRICTION DAMPERS FOR SEISMIC REHABILITATION OF EATON'S BUILDING, MONTREAL, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, 2004.

La curva forza-spostamento dei dissipatori ad attrito mostra un ciclo di isteresi di tipo rettangolare con una lieve dissolvenza, simile al comportamento ideale elasto-plastico. Inoltre, essi hanno una rigidità iniziale alta e una forza di picco quasi costante alla variazione dello spostamento.

Degli studi sperimentali hanno confermato che i dissipatori ad attrito possono migliorare la prestazione sismica delle strutture, in quanto, rispetto ad una convenzionale, possono aumentare la capacità di dissipare energia e ridurre il drift. Uno tra i più utilizzati è il dissipatore Pall, dal nome del suo progettista. Sono caratterizzati dalla forma rettangolare e da due diagonali. All'interno dell'area rettangolare, ciascuna diagonale è divisa in due parti parzialmente sovrapposte con un giunto ad attrito al centro del dispositivo. La forza massima di attrito può essere controllata regolando il coefficiente di attrito delle superfici scorrevoli e la forza di compressione dei bulloni che le bloccano ed è indipendente dalla velocità di scorrimento e dall'area di contatto della superficie scorrevole.

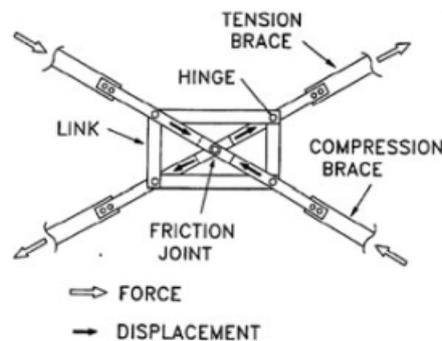


Figura 2.11: Dissipatore ad attrito di tipo Pall.

I due bracci si comportano elasticamente sia in tensione che in compressione; quando interviene il carico sismico, il dissipatore slitta ad un predeterminato carico ideale prima della plasticizzazione della struttura primaria, la diagonale compressa cede e viene sottoposta a grandi deformazioni fuori dal piano, mentre la diagonale tesa resta in campo elastico fino ad un certo livello del carico sismico. In seguito ad un aumento considerevole del carico sismico, la diagonale tesa inizia a indurre uno slittamento al giunto ad attrito; la forza di attrito è determinata in funzione del coefficiente di attrito del dissipatore. Questo attiva i quattro collegamenti che impediscono alla diagonale compressa di slittare. Quando il carico è invertito, la diagonale, in origine compressa, può assorbire energia in tensione.

Vantaggi e svantaggi dei dissipatori ad attrito

I vantaggi di utilizzare un dissipatore ad attrito sono:

1. il periodo delle strutture in cui sono installati varia con l'ampiezza della vibrazione, portando a vibrazioni di frequenza a banda larga, evitando in tal modo la risonanza;
2. una più grande dissipazione di energia rispetto ad altre tipologie di dissipatori, quindi sono sufficienti in numero minore;

3. hanno sia un meccanismo che una costruzione semplici, quindi anche un costo di progettazione e costruzione ridotti;
4. sono di facile installazione, compatti e sottili a sufficienza per essere nascosti nelle partizioni;
5. il costo di manutenzione è basso perché non necessitano di ispezioni regolari, riparazioni o sostituzioni prima (e dopo) un terremoto;
6. il funzionamento è indipendente dalla velocità di carico e dalla temperatura;
7. possono essere installati sia in edifici di nuova costruzione che esistenti.¹¹

Tali dispositivi presentano anche dei lati negativi. Ad esempio, le condizioni di scorrimento relativo possono cambiare col tempo, quindi necessitano di una (riabilitazione). Inoltre hanno un comportamento fortemente non lineare, il quale induce dei modi più elevati e richiede un'analisi non lineare. Infine, gli spostamenti possono risultare permanenti se alcun meccanismo di ricentraggio viene prodotto.¹²

Modellazione e progettazione dei dissipatori ad attrito

Il ciclo di isteresi dei dissipatori ad attrito è perfettamente rettangolare, molto simile ad un materiale elasto-plastico, quindi essi possono essere modellati come un elemento plastico fittizio che ha una forza assiale pari al carico di scorrimento e una rigidezza pari a quella degli elementi metallici.

Per una progettazione ottimale, sono necessarie una serie di analisi per determinare il carico di scorrimento dei dissipatori ad attrito in modo da ottenere una risposta minima.

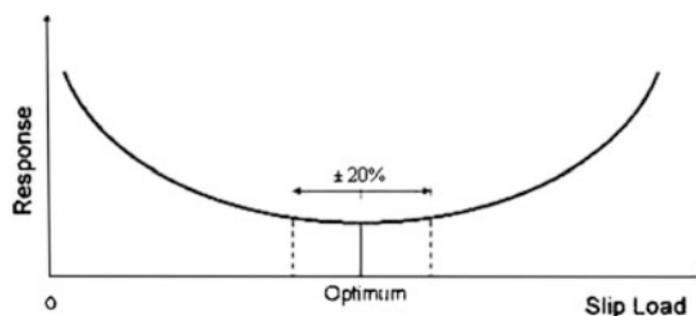


Figura 2.12: Relazione risposta-carico di scorrimento.

¹¹Junbo Jia, MODERN EARTHQUAKE ENGINEERING - Offshore and Land-based Structures, Springer, 2017 (fonte fig. 2.10 - 2.11)

¹²M.D. Symans, F.A. Charmey, A.S. Whittaker, M.C. Constantinou, C.A. Kircher, M.W. Johnson, R.J. McNamara, ENERGY DISSIPATION SYSTEMS FOR SEISMIC APPLICATIONS: CURRENT PRACTICE AND RECENT DEVELOPMENTS.

Scegliere un carico di scorrimento ottimale significa che la struttura ritorna quasi al suo allineamento iniziale sotto l'azione elastica. Per variazioni pari al $\pm 20\%$ rispetto al carico di scorrimento ottimale, non si hanno influenze significative sulla risposta.

In un'analisi preliminare, la struttura e il dissipatore ad attrito installato si possono studiare come un sistema duale, costituito da un modello ad un solo grado di libertà (SDOF = Single Degree of Freedom) con rigidità k_s e un dissipatore con rigidità k_d collegato a degli elementi di rigidità k_b . La rigidità dell'intero sistema risulta essere pari a:

$$k_{bd} = k_b k_d / (k_b + k_d) \quad (2.8)$$

Assumendo che il sistema si comporti in modo elastico, il rapporto di smorzamento viscoso equivalente può essere calcolato come segue:

$$\zeta_{eq} = \frac{E_d}{4\pi E_{tot}} = \frac{2FR(SR - FR)}{\pi(SR + FR^2)} \text{ for } FR < SR \quad (2.9)$$

dove FR è il rapporto tra i carichi di scorrimento e la forza totale esercitata dalla struttura; SR è il rapporto tra la rigidità del dissipatore e quella della struttura.

Quindi, la progettazione di un dissipatore ad attrito (come anche quella di un dissipatore metallico) avviene mediante la procedura seguente:

- effettuare un'analisi dinamica della struttura priva di dissipatori per capire fino a quale valore del rapporto di smorzamento essa ha un comportamento elastico;
- determinare la rigidità degli elementi diagonali e dei dissipatori come descritto precedentemente;
- stimare il valore di FR usando il rapporto di smorzamento del primo step;
- calcolare il carico di scorrimento (per i dissipatori ad attrito o Friction Dampers) e quello di plasticizzazione (per i dissipatori metallici o Yielding Dampers) sulla base di FR;
- effettuare un'analisi non lineare e un controllo della capacità strutturale utilizzando i parametri calcolati negli step precedenti.¹³

¹³Junbo Jia, MODERN EARTHQUAKE ENGINEERING - Offshore and Land-based Structures, Springer, 2017.

2.3.4 Dissipatori isteretici metallici

Tali dissipatori assorbono energia attraverso il comportamento isteretico durante la deformazione plastica dei componenti metallici. Sono economici e sono in grado di utilizzare deformazioni di fessurazione, di taglio o assiali. Grazie all'installazione di essi, non solo l'energia dissipata, ma anche la rigidità e la resistenza della struttura primaria, sono aumentate.

La curva forza-spostamento dei dissipatori metallici mostra come la risposta dei dispositivi è in fase con quella della struttura, quindi la forza di picco del dissipatore è raggiunta quando anche lo spostamento è massimo, e viceversa.

Tali dissipatori possono essere sottoposti a diversi cicli di carico senza presentare danni prematuri; di notevole interesse è anche il comportamento isteretico stabile sotto ripetute deformazioni inelastiche.

Sono simili ai dissipatori ad attrito: hanno un comportamento non lineare e sono indipendenti dalla velocità. Il metodo di progettazione è quasi identico a quello del sistema duale utilizzato per quelli ad attrito, descritto nella sezione precedente.¹⁴

Vantaggi e svantaggi dei dissipatori metallici

I vantaggi si riassumono nei seguenti punti:

1. hanno un comportamento isteretico stabile;
2. la loro affidabilità è duratura nel tempo;
3. sono insensibili ai cambiamenti di temperatura;
4. i materiali e il comportamento sono familiari nella pratica ingegneristica.

Gli svantaggi sono i seguenti:

1. presentano danni dopo il terremoto, quindi richiedono la sostituzione;
2. hanno un comportamento non lineare, quindi richiedono una analisi non lineare.¹⁵

2.3.5 Confronto tra i sistemi di dissipazione dell'energia analizzati

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva contenente lo schema costruttivo, il comportamento isteretico, il modello fisico, i vantaggi e gli svantaggi dei sistemi di dissipazione descritti precedentemente.

¹⁴Junbo Jia, MODERN EARTHQUAKE ENGINEERING - Offshore and Land-based Structures, Springer, 2017.

¹⁵M.D. Symans, F.A. Charmey, A.S. Whittaker, M.C. Constantinou, C.A. Kircher, M.W. Johnson, R.J. McNamara, ENERGY DISSIPATION SYSTEMS FOR SEISMIC APPLICATIONS: CURRENT PRACTICE AND RECENT DEVELOPMENTS (fonte fig. 2.13).

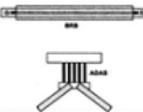
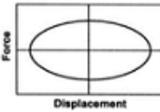
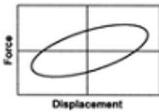
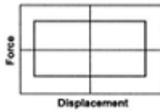
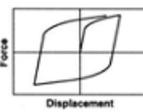
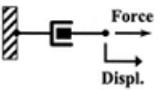
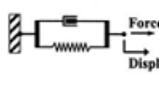
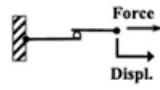
	DISSIPATORE VISCOSO	DISSIPATORE VISCOELASTICO	DISSIPATORE AD ATTRITO	DISSIPATORE METALLICO
Costruzione base				
Comportamento isteretico ideale				
Modello fisico ideale				Non disponibile
Vantaggi	<ul style="list-style-type: none"> - attivati con spostamenti piccoli - forza di ripristino minima - proprietà indipendenti da frequenza e temperatura - aumento smorzamento del 20-50% senza aumento rigidità 	<ul style="list-style-type: none"> - si attivano anche con spostamenti piccoli - producono una forza di ripristino - comportamento lineare e modello semplificato 	<ul style="list-style-type: none"> - grande dissipazione di energia ad ogni ciclo - insensibilità a temperatura e velocità di carico - costi di progettazione, costruzione e manutenzione ridotti - facile installazione 	<ul style="list-style-type: none"> - comportamento isteretico stabile - affidabilità a lungo termine - insensibilità alla temperatura materiali e comportamento familiari per ingegneri
Svantaggi	<ul style="list-style-type: none"> - possibile perdita di fluido da guarnizioni 	<ul style="list-style-type: none"> - capacità di deformazione limitate - dipendente da frequenza e temperatura - possibilità di distacco e lacerazione del materiale VE 	<ul style="list-style-type: none"> - scorrimento relativo può cambiare col tempo - comportamento non lineare, richiesta analisi non lineare - spostamenti permanenti se non è prodotto meccanismo di ricentraggio 	<ul style="list-style-type: none"> - danno dopo il terremoto, richiesta sostituzione - comportamento non lineare, richiesta analisi non lineare

Figura 2.13: Sintesi delle caratteristiche dei sistemi di dissipazione passiva.

Escludendo i dissipatori ad attrito e metallici poiché presentano un comportamento fortemente non lineare, di seguito si soffermerà l'attenzione sui dispositivi viscosi e viscoelastici che, per le caratteristiche di costruzione e i vantaggi che presentano, risultano più adatti allo sviluppo dell'argomento oggetto della tesi. Nel paragrafo successivo, pertanto, si considera in modo più approfondito l'utilizzo di tali sistemi in edifici storico-monumentali.

2.4 Stato dell'arte degli interventi di protezione passiva sui beni culturali

In letteratura scientifica si trovano pochi contributi in merito agli interventi di protezione passiva realizzati su edifici storico-monumentali. Ciò a conferma che l'applicazione di queste tecniche è un argomento contemporaneo e ancora in progresso. In questo paragrafo si riportano alcuni degli esempi più significativi in cui sono stati applicati sistemi di protezione passiva, in particolare di dissipatori viscosi.¹⁶

2.4.1 Applicazioni

Utilizzati in principio nell'industria militare e successivamente adattati in produzione commerciale (Taylor Devices, Inc.), i dissipatori viscosi sono una tecnologia recente ma adottata da circa un secolo.

Una recente applicazione si trova nell'intervento di recupero dell'edificio storico dell'Hotel Woodland, a Woodland (fig. 2.14). Nell'edificio composto da cinque piani sono stati inseriti 16 dissipatori fluidodinamici della Taylor Device, Inc. disposti come un controvento a "K".



Figura 2.14: Intervento di recupero dell'Hotel Woodland, California (1928): (a) vista prospettica dell'hotel; (b) dissipatori utilizzati.

Un altro intervento interessante è quello realizzato nel nuovo stadio di baseball di Seattle al New Pacific Northwest Baseball Park (fig. 2.15). In questo caso sono stati posizionati 8 dissipatori fluidodinamici di notevoli dimensioni e in grado di sopportare sismi di notevole intensità al posto di aste della copertura reticolare dello stadio.¹⁷

¹⁶L.De Stefani, TECNICHE INNOVATIVE PER IL MIGLIORAMENTO SISMICO DI EDIFICI STORICO-MONUMENTALI, relatore prof. R. Scotta, Dottorato di ricerca in scienze dell'ingegneria civile ed ambientale, XXIV ciclo, Università degli studi di Padova, 2012.

¹⁷A. Dellavalle, SULLA PROGETTAZIONE IN ZONA SISMICA DI STRUTTURE DOTATE DI DISSIPATORI FLUIDO-VISCOI:PROPOSTA DI UNA METODOLOGIA, relatore prof. E. Viola Dottorato di ricerca in meccanica delle strutture, XX ciclo, Università di Bologna, 2008.



Figura 2.15: Montaggio dei dissipatori nella copertura del nuovo stadio da baseball di Seattle

Di grande interesse è anche l'intervento realizzato al Millenium Bridge (fig. 2.16). Sin da subito dopo l'inaugurazione della passerella, si riscontrarono deformazioni esagerate. Fu deciso di installare dei dissipatori fluidodinamici in posizioni differenti: verticale, all'attacco della passerella; orizzontale, sulle ali; di controvento, sotto l'impalcato. Dai numerosi test condotti si ottennero risultati soddisfacenti, quindi l'intervento risultò positivo.¹⁸



Figura 2.16: Posizioni dei dissipatori sul Millenium Footbridge; Londra (1999): (a) sulle ali della passerella; (b) come controvento sotto l'impalcato della passerella.

Uno dei principali lavori di intervento che prevede sistemi di dissipazione energetica supplementare in Italia è quello di Castellano e altri effettuato sul duomo di Siena (fig. 2.17). Il timpano della facciata principale in muratura e rivestito in marmo, essendo molto pesante, tende a ribaltarsi fuori piano e i tiranti in acciaio esistenti risultano inefficaci. Perciò è stato realizzato un nuovo sistema di ritenuta costituito da profili circolari in

¹⁸D.P.Taylor, DAMPER RETROFIT OF THE LONDON MILLENIUM FOOTBRIDGE, Taylor Devices, Inc., 2002.

acciaio inox e dispositivi fluido-viscosi. L'intervento risulta efficace nei confronti delle azioni sismiche.¹⁹

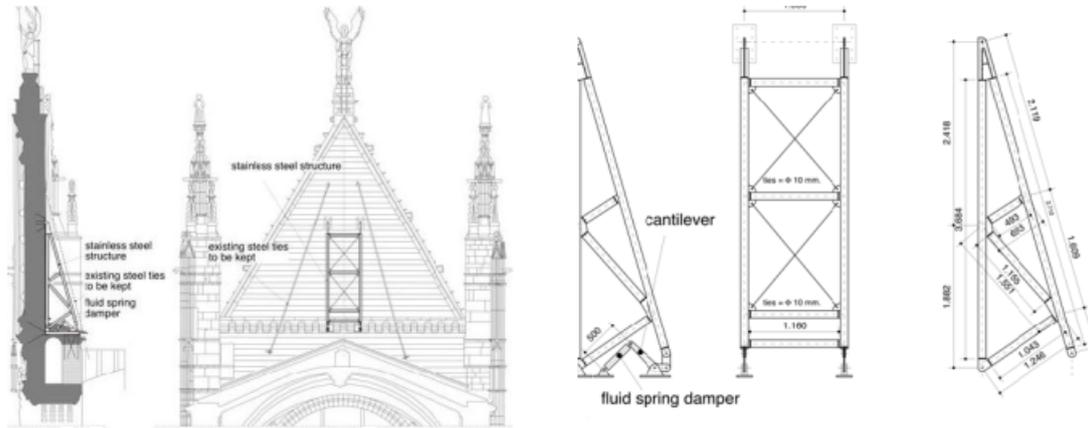


Figura 2.17: *Intervento del duomo di Siena: (a) applicazione del nuovo sistema di ritenuta del timpano; (b) nuovo sistema di ritenuta del timpano.*

¹⁹M.G. Castellano, G. Tosti, G.P. Bolletti, M. Tosti, FLUID SPRING DAMPERS FOR THE SEISMIC PROTECTION OF THE CATHEDRAL OF SIENA, Protection of Historical Buildings, PROHITECH 09 - Mazzolani Ed., 2009.

Capitolo 3

Caso studio: il salone C del Palazzo delle Esposizioni di Torino

3.1 Introduzione

La tesi intende studiare l'applicabilità della tecnica di dissipazione dell'energia sulle strutture voltate di Pier Luigi Nervi, che fanno parte del patrimonio culturale del XX secolo, al fine di produrre un miglioramento sismico sulle stesse. Il caso di studio è il salone C del Palazzo delle Esposizioni di Torino.

Poiché, come visto nella prima parte di questo lavoro, la fase conoscitiva di una costruzione storica è fondamentale per la scelta di un intervento efficace, si riporterà una descrizione accurata dello stato attuale del salone C preso in esame, prendendo in considerazione la formazione e altri importanti interventi del progettista Nervi. Successivamente, le informazioni dedotte saranno utilizzate per la modellazione con il Metodo degli Elementi Finiti (FEM, dall'inglese Finite Element Method), verificandone l'accuratezza.

3.2 Pier Luigi Nervi, il "costruttore" e l'"architetto"

Pier Luigi Nervi (Sondrio, 1891 - Roma, 1979) è uno dei più grandi e inventivi ingegneri strutturalisti del XX secolo. Egli condivise sempre la cultura degli ingegneri e degli architetti, operando in una continua interconnessione tra arte e scienza e tecnologia delle costruzioni.

Nervi si laureò in Ingegneria Civile all'università di Bologna nel 1913, sotto la guida autorevole di Silvio Canevazzi (1852-1918), una delle personalità di spicco in Italia per l'utilizzo della innovativa tecnica del calcestruzzo armato. Successivamente al servizio svolto nel Genio militare durante la prima guerra mondiale (1915-1918), praticò l'attività di ingegnere presso alcuni studi tecnici di società di costruzioni a Firenze e Bologna. Dopo il primo periodo di formazione, Nervi avviò una sua società di progettazione e costruzione (Nervi e Nebbioni, seguita dal 1932 da Nervi e Bartoli), mantenendo per tutto il corso della vita il duplice ruolo di progettista e costruttore. Negli anni 1960-1978 fondò lo Studio

Nervi, uno studio di consulenza ingegneristica, in collaborazione con i figli ingegnere e architetti.¹

Nel lungo e fruttuoso periodo di operato, si dedicò allo studio delle sue strutture e alle prove volte al collaudo di particolari tecniche di prefabbricazione. Contemporaneamente fu autore di molte opere, dalle prime realizzazioni del Teatro Augusteo a Napoli (1926-29), dello Stadio Berta a Firenze (1929-32) e dell' Aviorimessa di Orvieto (1935), alle successive tra gli anni '40 e '60 (Palazzo delle Esposizioni a Torino, il Palazzetto dello Sport a Roma, il grattacielo Pirelli a Milano, Palazzo del Lavoro a Torino), fino ai progetti americani (cattedrale di St Mary a San Francisco e il Centro Culturale di Norfolk in Virginia).²

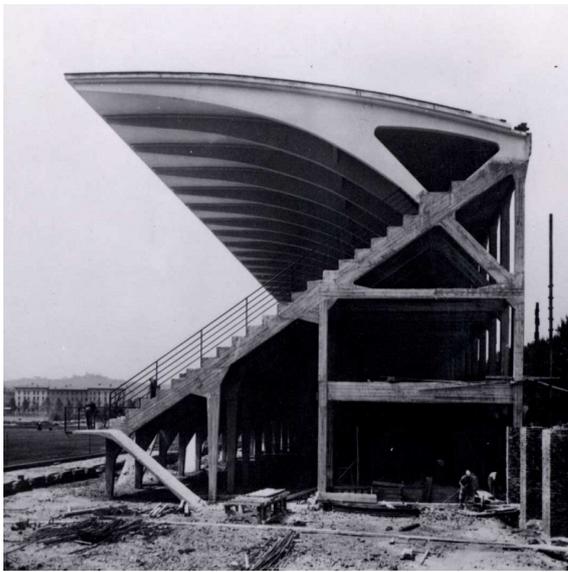


Figura 3.1: P.L. Nervi, Stadio comunale Berta, Firenze, 1929-1932 (fonte: <https://www.espazium.ch>).

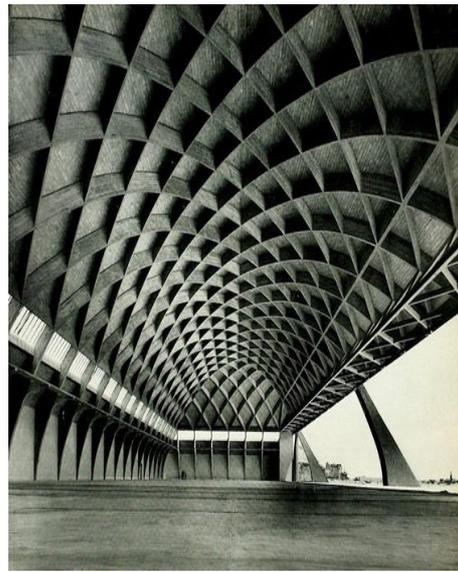


Figura 3.2: P.L. Nervi, Aviorimessa, Orvieto, 1935 (fonte: <https://it.pinterest.com/>).

L'approccio di Nervi al mondo delle costruzioni fu sempre caratterizzato dalla sua personalità polivalente (progettista, imprenditore, costruttore, sperimentatore, scrittore) e da una sperimentazione che con il passare degli anni portò risultati veramente unici.³ I suoi progetti più innovativi erano basati sull'utilizzo combinato delle tecniche del ferrocemento e della prefabbricazione. Esse furono utilizzate nel primo lavoro importante di Nervi dopo la seconda guerra mondiale, i saloni B e C del Palazzo delle Esposizioni

¹J.F. Abel, G. Arun, M.A. Chiorino, PIER LUIGI NERVI: ART AND TECHNOLOGY IN BUILDING, Journal of the international association for shell and spatial structures, Vol.54 Nos. 2 & 3, n. 176 & 177, September 2013.

²G. Tampone, N. Ruggieri, STRUCTURAL INVENTION AND PRODUCTION PROCESS IN THE PIER LUIGI'S WORK, Proceedings of the First International Congress on Construction History, January 2003.

³C. Olmo, C. Chiorino, PIER LUIGI NERVI, L'ARCHITETTURA COME SFIDA, Silvana Editoriale, Milano 2010.

di Torino (1947-1950), e riprese nella maggior parte dei suoi lavori successivi celebrati a livello internazionale.⁴



Figura 3.3: P.L. Nervi, Palazzo del Lavoro, Torino, 1959-1961 (fonte: <http://www.torinostoria.com/>).

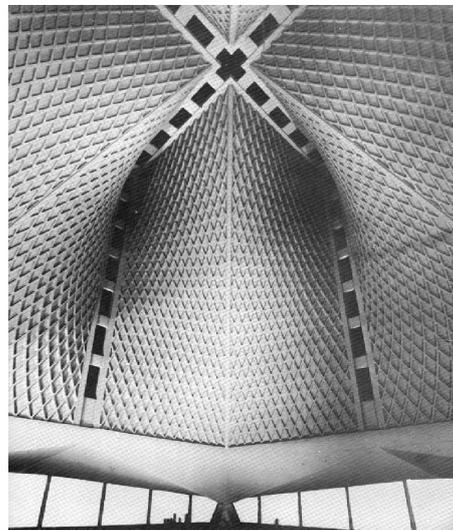


Figura 3.4: P.L. Nervi, Cattedrale di St Mary, San Francisco, 1971.

3.2.1 Le invenzioni strutturali

L'attitudine alla sperimentazione e all'innovazione ricorrenti nella carriera lavorativa di Nervi si ritrova soprattutto in occasione di concorsi per grandi architetture che richiedevano la costruzione di grandi sale dalla volta alta.

Egli concepiva l'intera costruzione come una composizione razionale di parti principali e secondarie della volta. Venivano realizzati degli elementi prefabbricati sottili, leggeri e resistenti, lisci o scanalati, che erano posizionati e successivamente collegati con delle nervature in calcestruzzo armato messe negli spazi lasciati vuoti appositamente, così da produrre una rete di elementi orientati nelle due direzioni principali e tenuti nella loro posizione dagli elementi prefabbricati.⁵

Le ricerche legate a elementi strutturali sono supportate da quelle sui materiali da costruzione, in particolare il calcestruzzo armato e il ferrocemento.⁶

⁴J.F. Abel, G. Arun, M.A. Chiorino, PIER LUIGI NERVI: ART AND TECHNOLOGY IN BUILDING, Journal of the international association for shell and spatial structures, Vol.54 Nos. 2 & 3, n. 176 & 177, September 2013.

⁵Brevetto n. 465636, P.L. Nervi, Roma. Procedimento di costruzione per la realizzazione di superfici resistenti piane o curve costituite da reticolati di nervature in cemento armato, completate o meno da solette di collegamento tra le nervature, 19 maggio 1950

⁶G. Tampone, N. Ruggieri, STRUCTURAL INVENTION AND PRODUCTION PROCESS IN THE PIER LUIGI'S WORK, Proceedings of the First International Congress on Construction History, January 2003.

"Il più bel materiale che l'umanità abbia mai inventato", diceva Nervi quando si riferiva al materiale che ha dominato il panorama costruttivo del XX secolo, mentre ne sperimentava le proprietà legate alla tecnica della prefabbricazione.⁷

La prima idea di ferroceemento risale al XIX secolo con Lambot e Monier, ma Nervi può essere definito il reinventore di questa tecnica. Nel 1943 registrò il suo brevetto del ferroceemento⁸, una riformulazione del calcestruzzo armato: si tratta di un feltro composto di sottili reti metalliche inglobate in un impasto di cemento e sabbia, adatto alla realizzazione di solette di ridotto spessore e configurazione complessa. Il materiale ottenuto presenta delle qualità peculiari: una isotropia strutturale perfetta, dovuta alla distribuzione omogenea dei rinforzi; un eccellente comportamento sia a trazione che compressione; la possibilità di una messa in opera senza cassaforma.⁹

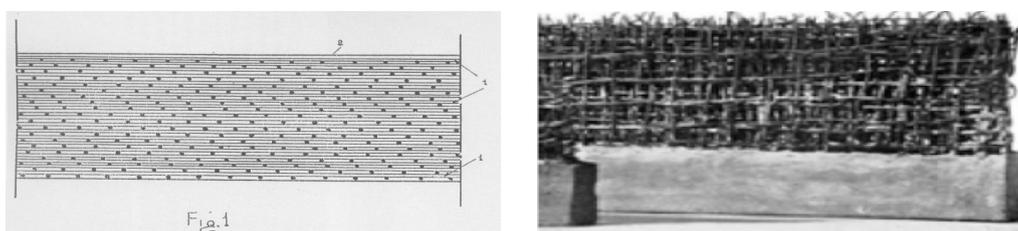


Figura 3.5: *Ferroceemento: (a) disegno del primo brevetto; (b) soletta realizzata in ferroceemento, 1943 (fonte dell'immagine: MAXXI Museo nazionale delle arti del XXI secolo, Roma, Collezione mAXXI Architettura, fondo P.L. Nervi).*

Tra le invenzioni di Nervi, una delle più interessanti sono le "strutture cementizie ondulate", brevettata nel 1948.¹⁰ Essa consiste nell'utilizzo di elementi prefabbricati lunghi da 2 a 3 metri, in ferroceemento e con una sezione trasversale realizzata a semi-onda. Delle barre in acciaio fuoriescono dal corpo degli elementi in modo da realizzare una connessione trasversale tra i singoli pezzi. Per evitare l'instabilità dei lunghi e sottili elementi durante il trasferimento, delle reti triangolari e spesso indeformabili sono aggiunte agli elementi; in alcuni casi, sempre come irrigidimento, si utilizzano dei diaframmi trasversali.¹¹ È in questo che consiste la "resistenza per forma" di cui parla Nervi: la capacità statica è "una diretta conseguenza di curvature o di corrugamenti dati a una superficie il cui spessore resta sempre molto piccolo rispetto alle dimensioni del complesso".¹²

⁷C. Olmo, C. Chiorino, PIER LUIGI NERVI L'ARCHITETTURA COME SFIDA, Silvana Editoriale, Milano 2010.

⁸Brevetto n. 406296, P.L. Nervi, che protegge l'invenzione del "ferroceemento", aprile 1943.

⁹C. Greco, THE "FERROCEMENTO" OF PIER LUIGI NERVI, THE NEW MATERIAL AND THE FIRST EXPERIMENTAL BUILDING, University of Rome Tor Vergata.

¹⁰Brevetto n. 445781, P.L. Nervi, Roma. Procedimento costruttivo per la realizzazione di strutture cementizie ondulate o curve con o senza tensione preventiva, 26 agosto 1948.

¹¹G. Tampone, N. Ruggieri, STRUCTURAL INVENTION AND PRODUCTION PROCESS IN THE PIER LUIGI'S WORK, Proceedings of the First International Congress on Construction History, January 2003.

¹²P.L. Nervi, COSTRUIRE CORRETTAMENTE, Hoepli, Milano 1965.

3.2.2 La prefabbricazione strutturale

"La prefabbricazione apre ai progettisti i più ampi e promettenti campi della vera e grande architettura", così affermò Nervi nel 1955. Il primo esempio di prefabbricazione in Italia si ritrova nel 1908 per la realizzazione dell'impalcato del Ponte Risorgimento a Roma, a opera dell'ingegner Porcheddu su progetto di Hennebique. Successivamente, per molto tempo il procedimento venne abbandonato.

La "prefabbricazione strutturale" viene intesa da Nervi come una "preparazione fuori opera delle singole parti in cui è stata preventivamente decomposta una struttura lavorante staticamente nel suo complesso". Le singole parti non hanno una precisa funzione statica a sé stante, ma solo dopo la ricomposizione di tutte le parti si ottiene una struttura la cui monoliticità è assicurata dalla saldatura tra le diverse parti prefabbricate.¹³

La prima applicazione di tale procedimento da parte di Nervi fu sulla "seconda serie" di aviorimesse costruite tra in 1939 e il 1942 a Orvieto, Orbetello e Torre del Lago. Egli utilizzò lo stesso piano strutturale dell'aviorimessa realizzata a Orvieto nel 1936: per calcolarne la stabilità, utilizzò delle ipotesi semplificate che verificò su un modello collaudato nel laboratorio del Politecnico di Milano. Allo stesso tempo apportò dei cambiamenti cruciali: non utilizzò più le complesse e costosissime casseforme per realizzare la grande volta, ma la divise in parti il più possibile simili realizzandole a terra utilizzando le stesse casseforme più volte. Infine i pezzi furono sollevati in opera su una impalcatura leggera e uniti agli elementi vicini mediante saldature delle barre fuoriuscenti e gettando del calcestruzzo nei nodi. Alla fine del lavoro non vi era traccia alcuna di questa suddivisione in pezzi della struttura. Nel 1939 tale tecnica fu brevettata dallo stesso Nervi.¹⁴

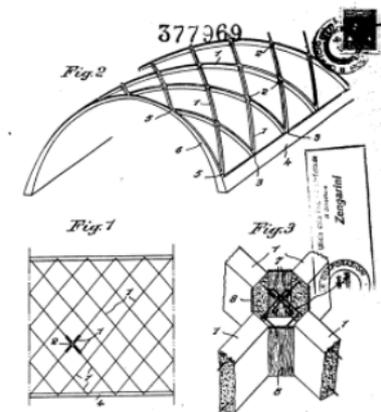


Figura 3.6: Brevetto n. 377969, "Tecnica della prefabbricazione strutturale", 1939.

¹³C. Greco, PIER LUIGI NERVI Dai primi brevetti al Palazzo delle Esposizioni di Torino 1917-1948, Quart Verlag ed., Lucern 2008.

¹⁴J.F. Abel, G. Arun, M.A. Chiorino, PIER LUIGI NERVI: ART AND TECHNOLOGY IN BUILDING, Journal of the international association for shell and spatial structures, Vol.54 Nos. 2 & 3, n. 176 & 177, September 2013.

3.3 Palazzo delle Esposizioni di Torino

Il primo dei progetti realizzati da Nervi e dalla sua impresa a Torino è il Palazzo delle Esposizioni: la volontà di alcuni politici e industriali di risollevare la città dallo scenario del secondo dopoguerra, rilanciando l'industria dell'automobile con una mostra internazionale nel 1948, porta a indire un appalto concorso a inviti per la realizzazione di un grande salone per esposizioni sulle macerie del Palazzo della Moda al Parco del Valentino.

Il planivolumetrico fu predisposto da Roberto Biscaretti Di Ruffia, per conto della società "Torino Esposizioni", fondata per l'occasione. Il progetto prevedeva il recupero del Palazzo della Moda, restaurandone il teatro, il ristorante circolare e la facciata principale. La ricostruzione-ampliamento del palazzo ad opera dell'impresa Nervi avviene probabilmente con unico affidamento, poiché tutti presenti nel progetto del 1947, tuttavia furono realizzati in tre tempi differenti e distinti. La prima realizzazione (1947-1948) fu quella del nuovo salone con funzione espositiva (salone B), prevista nella parte centrale, al posto del distrutto Giardino delle danze, insieme ad una sala minore (salone A). In seguito (1949-1950) si predispose la costruzione di un nuovo spazio (salone C) che occupò l'area del teatro all'aperto. Infine (1952-1954) avvenne l'ampliamento di cinque campate ad ovest del salone B.¹⁵

Il progetto fu concepito come una svolta delle caratteristiche urbane dell'area, ormai divenuta un collegamento *costruito ma trasparente* tra la città e il fiume Po e il Salone dell'Automobile del 1954.¹⁶



Figura 3.7: P.L. Nervi, Palazzo delle Esposizioni, Torino, 1947-1954 (fonte: *1st Footwear and Leather Goods Exhibition catalog*, 1961).

¹⁵C. Greco, PIER LUIGI NERVI Dai primi brevetti al Palazzo delle Esposizioni di Torino 1917-1948, Quart Verlag ed., Lucern 2008.

¹⁶C. Olmo, C. Chiorino, PIER LUIGI NERVI, L'ARCHITETTURA COME SFIDA, Silvana Editoriale, Milano 2010.

3.3.1 Salone B

Il salone B, denominato anche Salone Agnelli, fu definito "il più bel palazzo che l'Italia abbia mai costruito" e fu "la più grande costruzione in ferrocemento mai eseguita"¹⁷ fu inaugurata il 15 settembre 1948 in occasione del XXXI Salone dell'Automobile.

Il salone espositivo centrale è caratterizzato da un grande spazio rettangolare di 96 m di larghezza suddiviso in una navata centrale di 71 m di luce, coperta da una volta impostata su due serie continue di pilastri verticali, e due navate laterali più piccole a due livelli; infine, un'abside semicircolare, coperta da un solaio piano, conclude l'edificio.



Figura 3.8: Salone B: (a) veduta dello spazio espositivo; (b) particolare dell'abside (fonte: <http://www.costruirecorrettamente.org>)

La realizzazione della grande volta dell'edificio mise alla prova Nervi, poiché dovette fare i conti con i tempi ristretti e la scarsità di materiali. Il progetto prevedeva la realizzazione di una struttura leggera per la cui costruzione si potessero sovrapporre il maggior numero di fasi lavorative. Realizzando una sottile superficie ondulata in senso longitudinale e utilizzando il ferrocemento in combinazione con la tecnica della prefabbricazione riuscì ad ovviare ai due problemi. Inoltre, i serramenti inseriti sui lati inclinati rettilinei delle onde permisero al progettista di risolvere il problema dell'illuminazione del grande ambiente.¹⁸

I pilastri laterali inclinati sono posizionati ogni 7.5 m e su di essi si sviluppano dei "ventagli" che raggruppano ciascuno tre onde di copertura, risolvendo in questo modo il giunto tra volta e trave cassone continua tra i pilastri con un vincolo a semincastro. I ventagli, inoltre, raccolgono le spinte e le trasmettono al rispettivo pilastro sottostante. Ogni arco è composto da tredici elementi in ferrocemento, a passo di 2.5 m, di lunghezza 4 m e altezza

¹⁷P. Napoli, TIENE BENE IL FERROCEMENTO, in "Il Giornale dell'Architettura", n. 13, 2003.

¹⁸C. Greco, PIER LUIGI NERVI Dai primi brevetti al Palazzo delle Esposizioni di Torino 1917-1948, Quart Verlag ed., Lucern 2008.

variabile intorno a 1.5 m e spessore di 38 mm, costruiti in serie e montati in continuità su apposita armatura tubolare e resi solidali da nervature in cemento armato gettate in opera. La semicupola è realizzata da formelle in ferroceemento a losanghe, la cui forma viene convenientemente ridotta al minor numero di tipi.¹⁹

3.3.2 Salone C

Nel 1949 la società "Torino Esposizioni" decise di allargare il complesso aggiungendo il nuovo Salone C o anche detto Palazzo del Ghiaccio. I tempi di costruzione furono davvero ridotti (circa cinque mesi) per la realizzazione del nuovo spazio di dimensioni in pianta di 65 x 50 m. Un altro problema che Nervi dovette affrontare fu quello concettuale e architettonico di armonizzare la nuova struttura con quelle esistenti.

Furono presentate tre soluzioni per la volta: una volta a crociera; una volta nel senso dei 65 m e solai piani laterali con grandi lunette di illuminazione; una volta a padiglione portata da 4 arconi inclinati. La scelta più vantaggiosa era la terza perché presentava rispetto alla prima un vantaggio economico e rispetto alla seconda una più organica formula statica. È composta da tavelloni in ferroceemento, realizzati con gli elementi utilizzati per la semicupola del Salone B, e da nervature realizzate in opera, che nella parte terminale a ridosso degli archi non sono tamponate dai tavelloni, lasciando così filtrare la luce zenitale proveniente dai lucernai. Quattro archi di cemento ribassati e inclinati sorreggono le travi di bordo su cui convergono le nervature incrociate della volta. Gli archi convergono nei quattro vertici in un unico elemento, creando così un nodo strutturale interessante. I solai perimetrali in ferroceemento sono realizzati con travi ondulate.²⁰



Figura 3.9: Salone C: (a) veduta dello spazio espositivo; (b) particolare della volta a padiglione (fonte: <http://www.museotorino.it/>).

¹⁹C. Olmo, C. Chiorino, PIER LUIGI NERVI, L'ARCHITETTURA COME SFIDA, Silvana Editoriale, Milano 2010.

²⁰E.Lenticchia, R.Ceravolo, C.Chiorino, DAMAGE SCENARIO-DRIVEN STRATEGIES FOR THE SEISMIC MONITORIN OF XX CENTURY SPATIAL STRUCTURES WITH APPLICATION TO PIER LUIGI'S TURIN EXHIBITION CENTRE, Engineering Structures 137, 2017, p. 256–267 (fonte fig. 3.10-3.11).

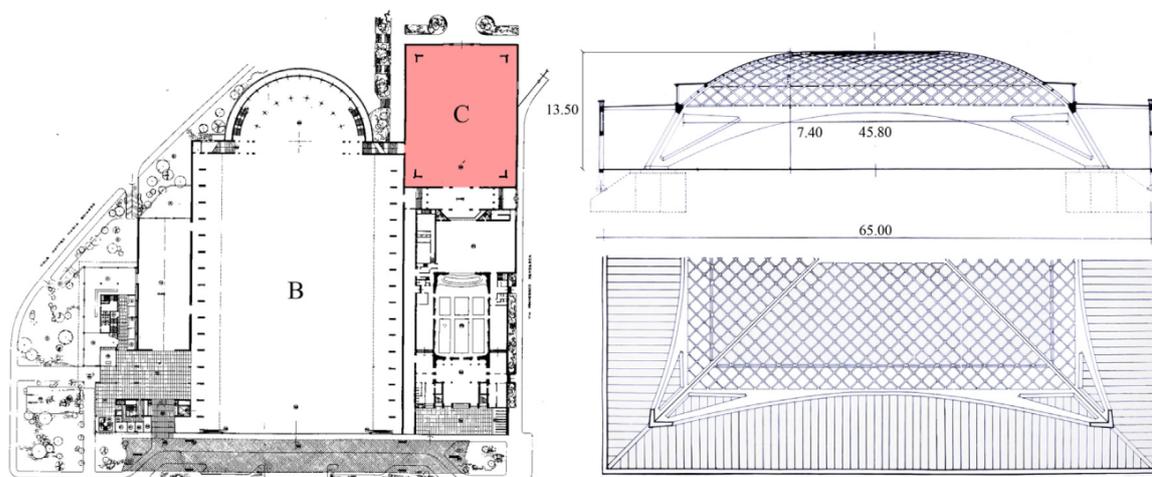


Figura 3.10: (a) Pianta del Palazzo delle Esposizioni a Torino; (b) Pianta e sezione del Salone C.

3.4 Modellazione del Salone C

A partire dalla modellazione geometrica tridimensionale, realizzata in un precedente lavoro²¹ utilizzando il software RHINOCEROS 5.0, si svilupperà un modello agli elementi finiti che verrà utilizzato nelle successive analisi.

3.4.1 Modello geometrico

Il modello geometrico utilizzato è stato realizzato in seguito ad una attenta fase conoscitiva iniziale, che ha permesso di ottenere le informazioni utili sulle proprietà fisco-geometriche dei componenti che costituiscono la struttura del Salone C. È stata realizzata la modellazione tridimensionale di tutti gli elementi: la volta a padiglione, gli archi inclinati, i solai perimetrali, i muri di tamponamento.

Un'osservazione importante è quella relativa alla modellazione del solaio ondulato. Nella realtà è costituito dall'affiancamento di un certo numero di travi ondulate in ferrocemento, che rappresentano la parte resistente, sulle quali si scarica il peso proprio dei tavelloni in laterizio e di una soletta in calcestruzzo, entrambi dello spessore di 4 cm.

Poiché nel primo tentativo di modellazione della sezione reale del solaio sono stati riscontrati numerosi problemi nella costruzione della mesh, è stato optato di realizzare un solaio equivalente piano comprensivo di soletta in calcestruzzo e tavelloni in laterizio.

²¹F. Antonucci, POSIZIONAMENTO OTTIMALE DI SENSORI NEL CAMPO DEI BENI ARCHITETTONICI DEL XX SECOLO: IL SALONE C-PALAZZO DELLE ESPOSIZIONI DI TORINO, relatori R. Ceravolo e E. Lenticchia, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Politecnico di Torino, Ottobre 2015.

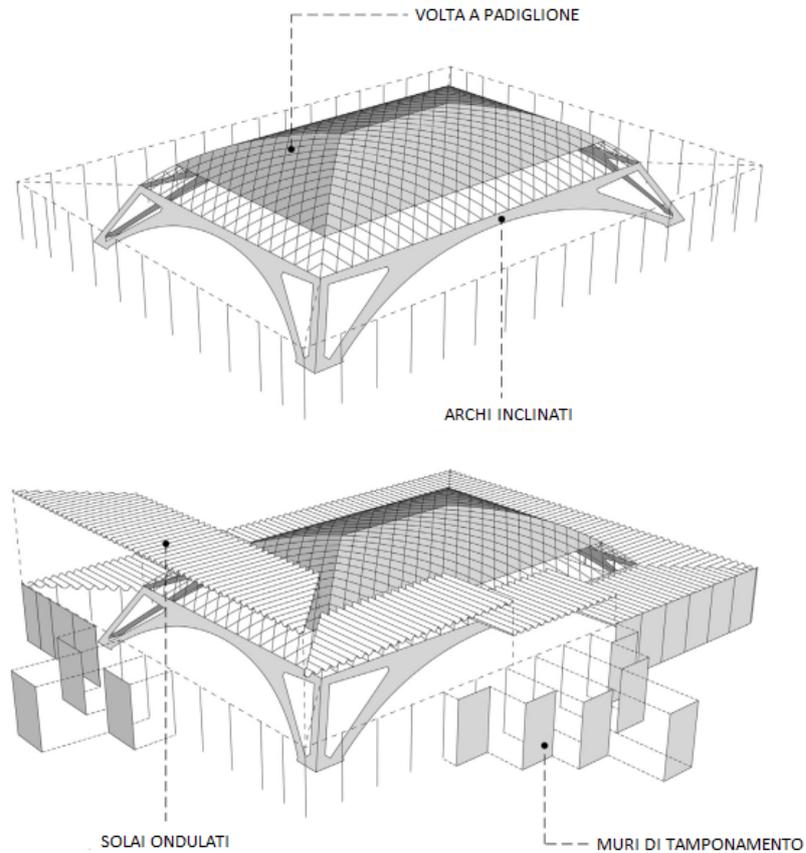


Figura 3.11: *Modello geometrico del Salone C.*

3.4.2 Modello agli elementi finiti

La modellazione agli elementi finiti è stata realizzata con il software di calcolo ANSYS (v. 17.2). I passaggi effettuati per ottenere il modello finito sono stati i seguenti:

- 1) importazione dei singoli elementi geometrici modellati in RHINOCEROS 5.0 in formato "Parasolid";
- 2) raggruppamento degli elementi strutturali in "Component Manager (CM)", in modo da facilitare la successiva fase di attribuzione di materiali e sezioni;
- 3) definizione di "Element Type (ET)", materiali e sezioni e attribuzione delle proprietà geometriche-meccaniche ai CM definiti precedentemente;
- 4) mesh degli elementi (linee e aree).

Gli ET scelti per la modellazione sono i seguenti:

- Beam 188: è basato sulla teoria della trave di Timoshenko, che tiene conto degli effetti della deformabilità a taglio. È un elemento a due nodi e per ciascun nodo si

possono avere sei o sette gradi di libertà: traslazioni nelle direzioni x , y , z e rotazioni lungo gli assi x , y , z e il settimo, detto "warping magnitude", è opzionale. Nei software di calcolo agli elementi finiti è ampiamente utilizzato per la modellazione di travi snelle o tozze; nel caso in esame è utilizzato per la modellazione delle nervature della volta, delle travi e dei pilastri della struttura;

- Shell 181: è un elemento a quattro nodi con sei gradi di libertà per ciascun nodo: traslazioni nelle direzioni x , y , z e rotazioni lungo gli assi x , y , z . È molto utilizzato per l'analisi lineare o non lineare di strutture a guscio di moderato spessore, garantendo sia un comportamento flessionale che membranale; nel caso in esame è utilizzato per la modellazione delle aree della struttura (tavelloni romboidali della volta, solai perimetrali, archi, muri).²²

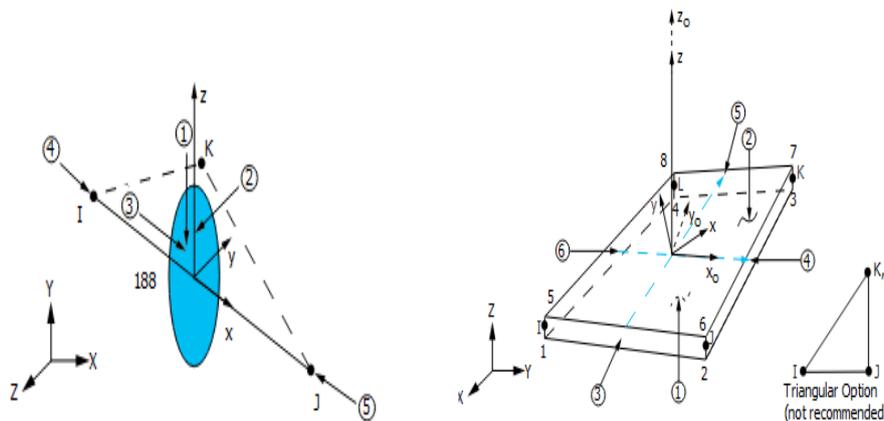


Figura 3.12: *Element Types: (a) beam 188; (b) shell 181 (fonte: ANSYS Help 17.2).*

Le caratteristiche meccaniche dei materiali (modulo elastico, coefficiente di Poisson, densità) sono state ipotizzate attraverso valori di letteratura ricavati durante la fase conoscitiva del Salone C. Di seguito sono riportati i dati utilizzati durante la modellazione:

Materiale	E [GPa]	ν	Densità [kg/m ³]
Calcestruzzo armato	30	0.2	2500
Ferrocemento	26.08	0.2	2200
Muratura	2	0.2	1100

Tabella 3.1: *Proprietà dei materiali.*

Anche i dati relativi alle sezioni sono stati ricavati nella fase conoscitiva; in particolare nel caso oggetto di studio sono state utilizzate otto differenti sezioni di tipo "beam" e quattro differenti sezioni di tipo "shell".

²²ANSYS Help 17.2

Nella realizzazione della mesh è stato importante far coincidere i nodi degli elementi adiacenti, in modo tale da garantire la continuità. Per ottenere un risultato ottimale, spesso è stato assegnato lo stesso numero di divisioni nelle linee di interfaccia tra elementi strutturali adiacenti (comando "NDIV" nella sezione manuale di "Size Controls"); in altri casi è stato utilizzato il comando "NUMMRG" per unire i nodi coincidenti o equivalentemente definiti, secondo una fissata tolleranza.

È stato importante anche utilizzare una mesh di tipo "Free" nel caso degli archi, per la loro particolare forma.

Realizzata la mesh di tutti gli elementi, il modello agli elementi finiti ottenuto è composto da 18322 elementi totali, di cui 11262 di tipo "shell" e 7060 di tipo "beam".

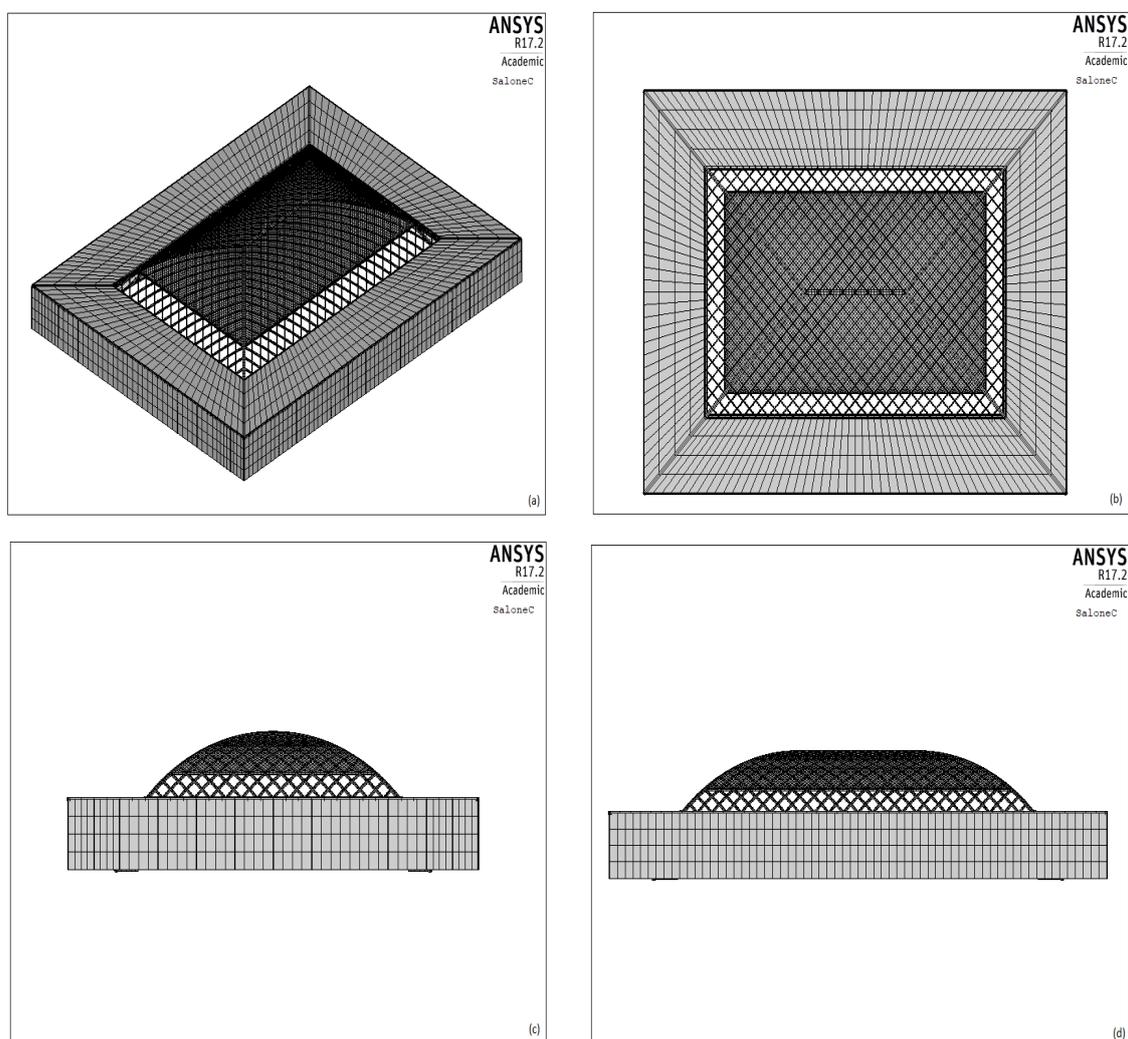


Figura 3.13: Modello FEM del Salone C: (a) vista assometrica; (b) vista dall'alto; (c) vista lato corto; (d) vista lato lungo.

3.4.3 Analisi statica

Ai fini del lavoro, è stato importante realizzare un'analisi statica del modello FEM ottenuto, in modo da confrontare i risultati ottenuti con quelli riportati da Nervi in un articolo nella rivista "Rassegna tecnica", citato di seguito:

"Lo schema statico della soluzione adottata è di una evidente semplicità. La reazione inclinata trasmessa dalla volta a padiglione lungo il suo perimetro è riportata alle fondazioni da 4 archi ribassati disposti in piani aventi una inclinazione che corrisponde approssimativamente a quella ottenuta componendo la spinta stessa con i pesi dell'arco e del solaio perimetrale. È tuttavia evidente che, anche se si riuscisse a determinare tale inclinazione in modo esatto, si avrebbe sempre la possibilità di sensibili scostamenti da essa per effetto dei sovraccarichi accidentali; nasce quindi la necessità di un elemento resistente orizzontale capace di assorbire il più o il meno della componente orizzontale del sistema; tale compito è affidato ai solai perimetrali che, opportunamente rinforzati, costituiscono un efficacissimo irrigidimento lungo il perimetro della volta. Se il sistema statico nelle sue linee schematiche è semplice e chiaro, non altrettanto è il problema del calcolo qualora lo si voglia affrontare con un certo amore di esattezza teorica. Infatti non solo è già complicata l'indagine del funzionamento statico della volta che, per il suo spessore, non può assimilarsi ad una membrana, ma difficoltà praticamente insuperabili si incontrano qualora si voglia considerare la collaborazione elastica della volta e del relativo sistema di appoggio costituito dagli archi e dalle travi. Ancora una volta mi è quindi occorso di avere a che fare con strutture che, pur avendo una evidente ed organica capacità resistente, presentano una così complicata iperstaticità da rendere praticamente impossibile la soluzione analitica del sistema statico, considerato nel suo complesso. Si aggiunga che tale soluzione, anche se raggiunta a costo di interminabili sviluppi, sarebbe, fatalmente, di valore più apparente che reale. Infatti i cedimenti elastici dovuti alla inevitabile successione costruttiva delle varie parti dell'opera (archi, solai, volta); quelle non prevedibili delle armature provvisorie in fase di costruzione e ad indurimenti iniziali; le diverse stagionature di parti tra loro collaboranti e i relativi differenti moduli elastici; i parziali disarmi prematuri dovuti al disaccordo tra le dilatazioni termiche della struttura e quelle dei ponteggi, vengono a creare un così complicato insieme di messe in carico, di ineguali deformabilità di stati anormali di sollecitazioni, da portare l'effettivo stato statico della struttura reale a ben grande distanza da quello corrispondente alle ipotesi di perfetta elasticità e di contemporanea messa in carico che stanno alla base di qualsiasi trattazione teorica. Nel caso in questione la volta è stata calcolata sia come volta sottile a membrana, sia come formata da archi elementari ognuno resistente per conto proprio. Il proporzionamento delle sezioni è il risultato di un ragionamento di approssimazione intermedia; gli archi, la reazione orizzontale dei solai e quindi il rafforzamento di essi sono stati verificati per l'una e l'altra ipotesi in base a ragionamenti, considerazioni e tentativi di indagare e capire la effettiva vita statica del sistema che sarebbe troppo lungo e difficile esporre in modo chiaro. Il risultato ottenuto ha dimostrato la sostanziale bontà del metodo. Le frecce a disarmo, misurate con 75 flessimetri, sono state regolarissime e molto limitate, raggiungendo nel centro della volta il valore massimo di circa 9 mm. Tutta la costruzione esaminata con la più scrupolosa accuratezza è risultata perfettamente integra, priva anche di quelle lesioni capillari così comuni per

le grandi strutture in cemento armato; in sostanza credo di poter affermare che l'opera è riuscita staticamente sana e di ottima funzionalità statica".²³

Analisi dei risultati

L'analisi statica è stata realizzata considerando il peso proprio della struttura e vincolando tutti i gradi di libertà dei nodi di base dei pilastri e degli archi. I risultati ottenuti sono comparabili con quelli riportati nel testo riportato di sopra.

In generale sia gli spostamenti che le rotazioni della struttura sono contenuti; in particolare:

- in direzione x, il valore medio degli spostamenti è di circa 0.0004 m e quello massimo è di circa 0.004 m;
- in direzione y, il valore medio degli spostamenti è di circa 0.0006 m e quello massimo è di circa 0.007 m;
- in direzione z, il valore medio degli spostamenti è di circa 0.004 m e quello massimo è di circa 0.017 m;
- lungo l'asse x, il valore medio delle rotazioni è di circa 0.0007 rad e quello massimo è di circa 0.005 rad;
- lungo l'asse y, il valore medio delle rotazioni è di circa 0.0004 rad e quello massimo è di circa 0.004 rad;
- lungo l'asse z, il valore medio delle rotazioni è di circa 0.0001 rad e quello massimo è di circa 0.001 rad.

Si riportano di seguito i risultati in forma grafica, ottenuti dal programma ANSYS, relativi al vettore somma degli spostamenti degli elementi strutturali più significativi: la volta, gli archi e i solai (fig. 3.15). Si fa notare come il valore dello scostamento massimo dalla geometria non deformata della volta è di circa 0,012 m, del tutto confrontabile con il valore ottenuto dai misuramenti fatti da Nervi di 0,009 m nel centro della volta.

Per quanto riguarda le sollecitazioni, gli sforzi lungo la componente x sono ridotti (sempre al di sotto di 100 kN/m² in valore assoluto) rispetto a quelli lungo le altre due componenti (y e z), che presentano dei picchi negli sforzi soprattutto sulla volta, gli archi e i pilastri. Gli sforzi di taglio sono quasi sempre al di sotto di 1000 kN/m², ad eccezione di un picco più elevato che interessa la volta (fig. 3.16).

²³P.L. Nervi, LA STRUTTURA PORTANTE DEL NUOVO SALONE DEL PALAZZO DI TORINO ESPOSIZIONI, Atti e rassegna tecnica della soc. degli ingegneri e architetti in Torino- N.S- A.IV- N.1-3- Gennaio-Marzo 1950.

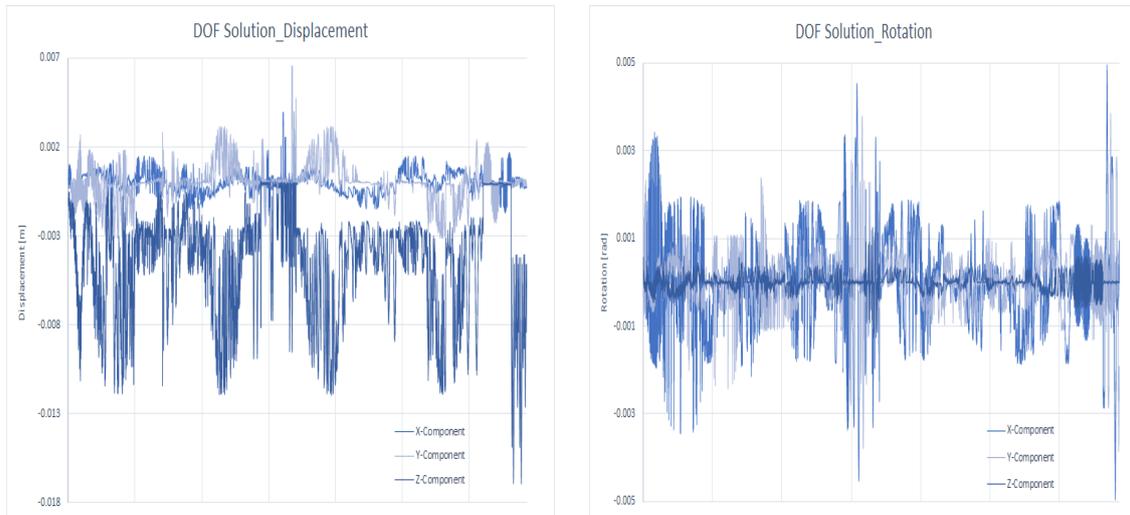


Figura 3.14: Risultati analisi statica: (a) spostamenti; (b) rotazioni.

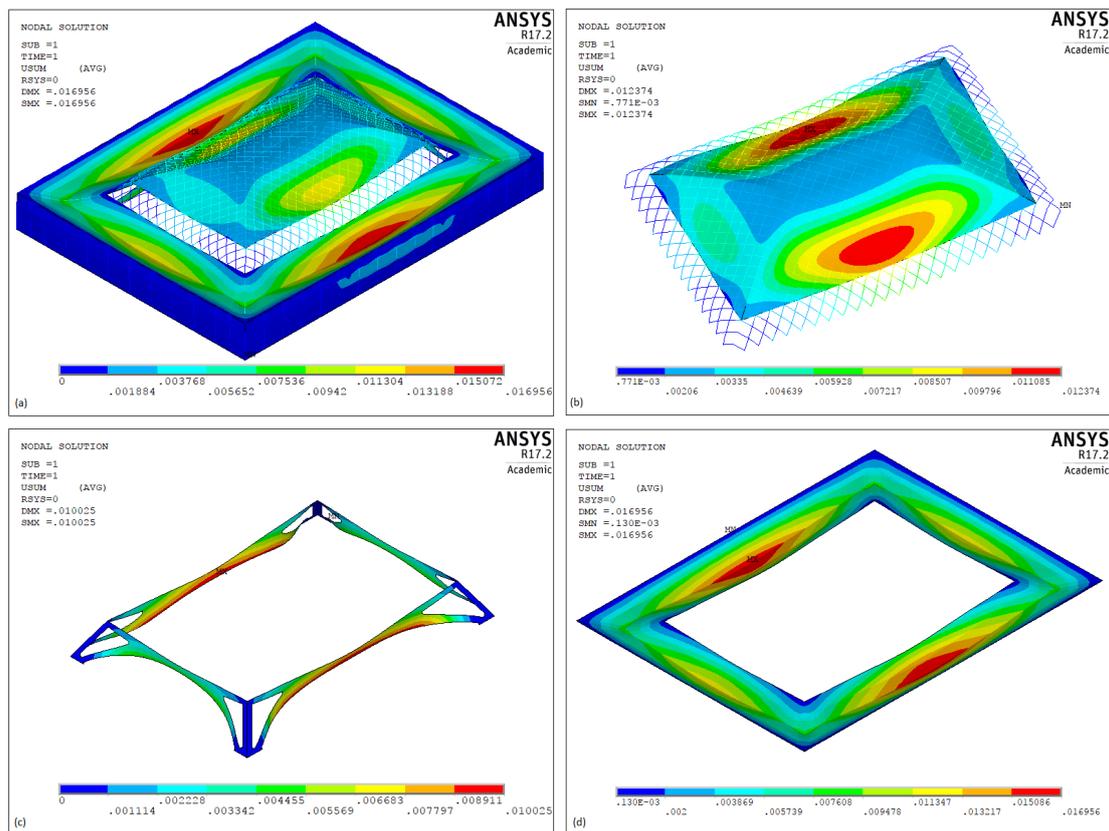


Figura 3.15: Risultati analisi statica, spostamenti: (a) struttura completa; (b) volta; (c) archi; (d) solai.

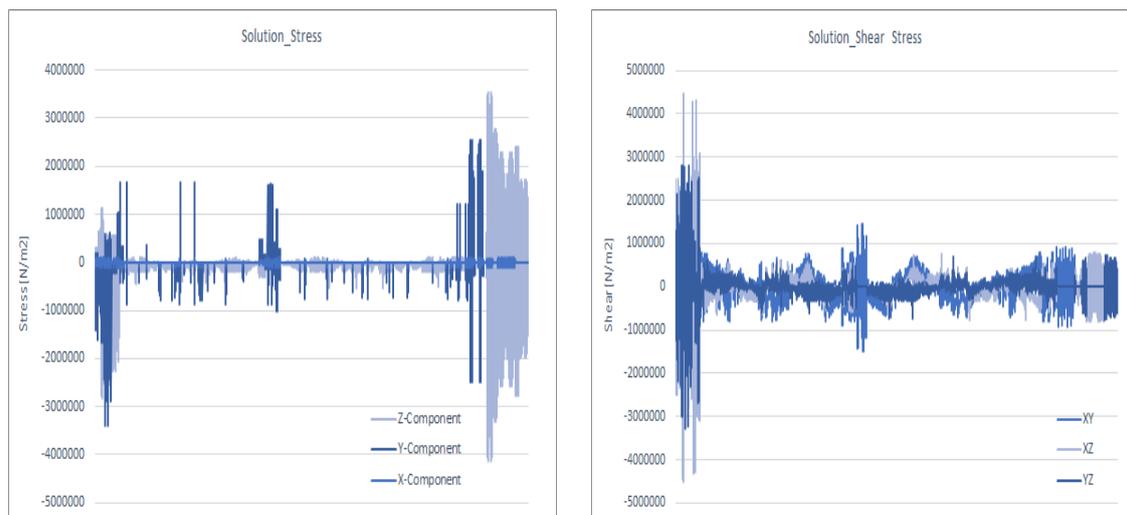


Figura 3.16: Risultati analisi statica: (a) sforzi in direzione x,y,z ; (b) sforzi di taglio.

3.4.4 Analisi modale

Per studiare il comportamento dinamico della struttura, il primo passo è quello di effettuare un'analisi modale in ANSYS. I modi di vibrare della struttura con i rispettivi periodi di vibrazione, risultanti dall'analisi, permetteranno di stabilire il posizionamento dei dissipatori nella struttura, in funzione degli spostamenti più significativi subiti dalla struttura.

Nelle tabelle da A.1 a A.6 (in allegato A.3) si riportano i risultati ottenuti dal software in seguito all'estrazione dei primi 15 modi di vibrare della struttura.

Inoltre nelle immagini da A.1 a A.8 (in allegato A.4) si riportano le soluzioni nodali relative agli spostamenti dei modi identificati come significativi, ottenute dagli screenshot dei risultati grafici di ANSYS.

Analisi dei risultati

La scelta dei modi significativi è stata effettuata in base alla frazione di massa partecipante nelle varie direzioni e successivamente sono stati classificati. Dei quindici modi estratti, sono stati identificati come significativi otto, di cui sei traslazionali e due flessionali.

MODE	FREQUENCY [Hz]	X	Y	Z	ROTX	ROTY	ROTZ
1	3.388	0.000000	0.000001	0.008750	0.008750	0.008751	0.000001
2	3.754	0.000001	0.082577	0.000000	0.000000	0.000000	0.075619
3	4.568	0.000000	0.512482	0.000077	0.000077	0.000005	0.469766
4	4.617	0.000000	0.000123	0.014597	0.014597	0.014623	0.000111
5	4.869	0.000002	0.000012	0.545331	0.545331	0.545316	0.000009
6	5.212	0.000001	0.273543	0.000000	0.000000	0.000022	0.251138
7	5.660	0.199186	0.000001	0.022551	0.022551	0.020873	0.016104
8	5.666	0.010850	0.000000	0.403780	0.403780	0.405521	0.000879
9	5.857	0.001172	0.000017	0.000023	0.000023	0.000025	0.000143
10	5.881	0.184481	0.000195	0.000001	0.000001	0.000015	0.018122
11	6.106	0.604201	0.000004	0.000001	0.000001	0.000009	0.048848
12	6.250	0.000002	0.000001	0.004840	0.004840	0.004838	0.000000
13	6.554	0.000000	0.101756	0.000001	0.000001	0.000002	0.093315
14	6.638	0.000102	0.029253	0.000048	0.000048	0.000000	0.025893
15	6.661	0.000002	0.000036	0.000000	0.000000	0.000000	0.000052

Tabella 3.2: Risultati analisi modale

MODE	FREQUENCY [Hz]	DESCRIZIONE DEI MODI SIGNIFICATIVI
3	4.56986	1° MODO TRASLAZIONALE IN DIR. Y: volta, solai, muri, archi
5	4.87034	1° MODO FLESSIONALE IN DIR. Z: volta, solaio lato lungo, archi
6	5.21543	2° MODO TRASLAZIONALE IN DIR. Y: volta, solai, muri, archi
7	5.65901	1° MODO TRASLAZIONALE IN DIR. X: solaio lato corto, archi
8	5.66693	2° MODO FLESSIONALE IN DIR. Z: solai, muri
10	5.88047	2° MODO TRASLAZIONALE IN DIR. X: volta, solai, muri, archi
11	6.10358	3° MODO TRASLAZIONALE IN DIR. X: volta, solai, muri, archi
13	6.54887	3° MODO TRASLAZIONALE IN DIR. Y: volta, solai, muri, archi

Tabella 3.3: Classificazione dei modi significativi

Capitolo 4

Applicazione al caso studio dei dispositivi a fluido viscoso

I dispositivi a fluido viscoso scelti per lo sviluppo dell'argomento oggetto della tesi sono risultati i più adatti, non solo per i vantaggi descritti nel capitolo 2, ma anche perché, grazie alla struttura costruttiva poco invasiva dal punto di vista della percezione visiva, permettono di ricondurre il miglioramento sismico del Salone C quale bene architettonico, entro l'ambito disciplinare del restauro, tenendo conto dei criteri fondamentali di riconoscibilità, reversibilità, compatibilità e minimo intervento.

4.1 Proposta di miglioramento sismico

L'analisi modale effettuata sulla struttura del Salone C ha permesso la scelta del posizionamento dei dispositivi a fluido viscoso. Essi verranno introdotti nella parte libera delle nervature della volta e nelle parti angolari degli archi, poiché sono due zone caratterizzate da considerevoli spostamenti fuori piano.

4.1.1 Progetto dei dissipatori viscosi

Sia le NTC 2008 che l'EC8 non contengono parti riguardanti i dispositivi a fluido viscoso. Per questo motivo nel presente lavoro si fa riferimento alla normativa americana e, in particolare, alle NEHRP 2000 (Recommended Provisions for Seismic Regulation for new buildings and other structures - FEMA 450). Tale normativa include dei metodi semplificati di analisi per le strutture con sistemi di dissipazione dell'energia. Per il dimensionamento dei dispositivi di dissipazione si tiene conto delle seguenti approssimazioni:

- si riconduce il problema ad un sistema ad un grado di libertà;
- si considerano dissipatori con un comportamento lineare.¹

¹O.M. Ramirez, M.C. Constantinou, EVALUATION OF SIMPLIFIED METHODS OF ANALYSIS OF YIELDING STRUCTURES WITH DAMPING SYSTEMS, Earthquake Spectra, 18(3), p.501-530, 2002.

Fatte queste premesse, la relazione utilizzata per la stima del coefficiente di smorzamento viscoso $\xi_{sd,1}$ è la seguente:²

$$\xi_{sd,1} = \frac{T_1 C_{Nj} f_j^2}{4\pi M} \quad (4.1)$$

dove:

- T_1 è il periodo fondamentale del sistema;
- C_{Nj} è la costante di smorzamento viscoso;
- M è la massa del sistema;
- f_j è il coefficiente di amplificazione dovuto all'orientamento del dispositivo a fluido viscoso (in questo caso assunto pari a 1 poiché orientato nella direzione del moto).

L'ordine di grandezza dello smorzamento aggiunto ad una struttura è compreso nell'intervallo 5-45%, che è molto ampio e varia con il tipo di struttura e di eccitazione. Sono stati definiti pertanto dei livelli di smorzamento aggiunto in base ai risultati di precedenti progetti, da prendere in considerazione come linee guida.³

Tipo di struttura	% Smorzamento Aggiunto
Edifici alti, sisma e vento	5 - 15%
Edifici 1-15 piani, sisma	15 - 25%
Ponti non sospesi, sisma	30 - 45%
Ponti sospesi, sisma e vento	15 - 25%

Tabella 4.1: *Livelli di smorzamento aggiunto.*

Considerando uno smorzamento viscoso pari al 20% (tenendo conto delle percentuali di smorzamento aggiunto tabulate), il periodo fondamentale pari a 0,2952 s e la massa del sistema pari a 2595700 kg (dati ottenuti dall'analisi modale fatta in ANSYS), si può calcolare la costante di smorzamento viscoso invertendo la relazione dell'equazione 4.4. Si ottiene dunque C_{Nj} pari a 22099273.8 Ns/m, valore che andrà diviso per il numero di dispositivi introdotti per determinare la costante di smorzamento viscoso per il singolo dissipatore.

²L.De Stefani, TECNICHE INNOVATIVE PER IL MIGLIORAMENTO SISMICO DI EDIFICI STORICO-MONUMENTALI, relatore prof. R. Scotta, Dottorato di ricerca in scienze dell'ingegneria civile ed ambientale, XXIV ciclo, Università degli studi di Padova, 2012.

³D.P. Taylor, BUILDINGS: DESIGN FOR DAMPING, Taylor Devices Inc., July 1999 (fonte tab. 4.1).

4.1.2 Modellazione dei dissipatori viscosi

Il primo passo è stato quello di individuare un "Element Type" (ET) in ANSYS che descrivesse il comportamento di un dissipatore viscoso. La scelta è ricaduta nell'ET di tipo Combin 14, che ha capacità sia longitudinali che torsionali in applicazioni 1-D, 2-D o 3-D. Nel caso specifico l'opzione utilizzata è quella di spring-damper longitudinale. È un elemento uniassiale di tensione-compressione con tre gradi di libertà per ciascun nodo: traslazioni nelle direzioni nodali x, y e z. Né flessione né torsione sono considerate.

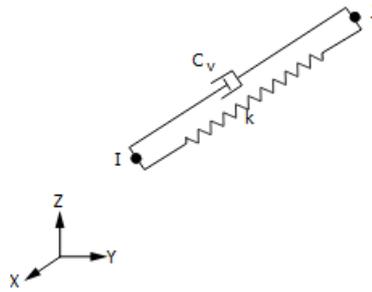


Figura 4.1: *Element Type: Combin 14 (fonte: ANSYS Help 17.2)*

La geometria, i nodi e il sistema di coordinate sono mostrati in figura 4.1. L'elemento è definito da due nodi, una costante elastica (k) e un coefficiente di smorzamento (c_v).

La forza di smorzamento è definita come:

$$F_x = -(c_v) \frac{du_x}{dt} \quad (4.2)$$

Il coefficiente di smorzamento c_v è dato da:

$$c_v = (c_v)_1 + (c_v)_2 \cdot \nu \quad (4.3)$$

dove ν è la velocità e la seconda parte del coefficiente di smorzamento $(c_v)_2$ tiene conto degli effetti non lineari.

La parte immaginaria della costante di rigidità (k_{imag}) contribuisce alla matrice di smorzamento strutturale. La forza immaginaria (F_x^*) è definita come:

$$F_x^* = \frac{-k_{imag}}{\omega} \frac{du_x}{dt} \quad (4.4)$$

Nel caso specifico si tiene conto delle seguenti considerazioni durante la fase di input dei dati delle "Real Constant" in ANSYS per l'elemento Combin 14:

- non è stata presa in considerazione la parte elastica poiché non è di interesse;
- la seconda parte del coefficiente di smorzamento è considerata nulla per rispettare la semplificazione di comportamento lineare.

4.1.3 Posizionamento dei dissipatori viscosi

Durante il progetto dei dissipatori viscosi un aspetto di notevole interesse è il posizionamento degli stessi nella struttura, poiché influenza l'efficacia dell'intervento e ne controlla il costo in termini di numero totale di dispositivi aggiunti.

Tuttavia, le norme di progettazione, non solo nazionali ma anche internazionali, non prescrivono alcun metodo di posizionamento ottimale per i sistemi di dissipazione dell'energia.

La distribuzione dei dispositivi in una struttura avviene spesso secondo delle regole pratiche comunemente accettate, quali smorzamento proporzionale alla rigidità del piano, posizionamento dei dispositivi ad un unico livello e distribuzione uniforme. Questi metodi portano ad avere nella maggior parte dei casi dei risultati difficilmente poco applicabili dal punto di vista economico, con dispositivi di dimensioni diverse e configurazioni difficilmente verificabili come ottimali. Anche le limitazioni specifiche del progetto, come ad esempio i vincoli architettonici, contribuiscono alla scelta del posizionamento dei dissipatori.

In letteratura scientifica esistono numerosi procedimenti di ottimizzazione del posizionamento dei dissipatori, classificati in metodi di tipo deterministico e stocastico. I primi mirano a trovare la soluzione precisa tra tutte quelle possibili; esempi di metodi deterministici includono gli algoritmi di ricerca Bayesian (partizione) e i metodi di approssimazione successiva. I secondi affrontano il problema avendo diverse possibili soluzioni, ma stimano quella migliore senza considerare ogni possibilità; esempi di metodi stocastici includono gli algoritmi genetici.⁴

Per il caso studio analizzato nel presente lavoro si è preferito utilizzare a scopo esemplificativo un approccio di pratica comune, piuttosto che i metodi di ottimizzazione presenti in letteratura. In particolare, si cita l'approccio usato dalla Taylor Decices, Inc.

Tale approccio è di tipo iterativo: all'inizio si distribuiscono uniformemente nella struttura dei dissipatori di uguali dimensioni, successivamente si riduce il numero dei dissipatori utilizzando dei dissipatori di dimensioni maggiori finché non si raggiunge un numero di dissipatori installati inferiore a 32 pezzi (limite stimato dall'autore per contenere i costi di installazione).⁵

Quindi, per ottenere un posizionamento ottimale dei dispositivi a fluido viscoso all'interno del Salone C, si procederà in modo iterativo introducendo un numero di dissipatori fisso negli archi (uno per ogni parte angolare per un totale di 8) e facendo variare il numero di quelli in corrispondenza delle nervature della parte libera della volta.

Il processo iterativo si concluderà quando si otterrà una soluzione ottimale in termini di risultato finale, cercando di rispettare le simmetrie della struttura nel posizionamento e di limitare il numero di dispositivi introdotti, per contenere i costi di progetto dell'intervento di miglioramento sismico.

⁴J.K. Whittle, STRATEGIC PLACEMENT OF VISCOUS DAMPERS FOR SEISMIC STRUCTURAL DESIGN, Department of Engineering Science, University of Oxford, 2011.

⁵D.P. Taylor, BUILDINGS: DESIGN FOR DAMPING, Taylor Devices Inc., July 1999.

4.1.4 Analisi dinamica di tipo time-history

L'analisi time-history effettuata per verificare l'efficacia della strategia di miglioramento proposta, richiede l'applicazione di accelerogrammi spettrocompatibili con lo spettro di risposta elastico. Come specificato nelle NTC 2008, in caso di analisi dinamica *le due componenti accelerometriche orizzontali sono applicate simultaneamente a formare un gruppo di accelerogrammi e gli effetti sulla struttura sono rappresentati dai valori medi degli effetti più sfavorevoli ottenuti dalle analisi, se si utilizzano almeno 7 diversi gruppi di accelerogrammi.*⁶

Nel caso specifico, lo spettro di progetto considerato è quello relativo al comune di Torino. Sono stati utilizzati sette accelerogrammi artificiali spettro-compatibili con lo spettro di risposta elastico, generati mediante il programma SIMQKE _ GR, che utilizza il codice di calcolo del Massachusetts Institute of Technology.⁷ Tutti gli accelerogrammi rispettano i vincoli per l'utilizzo di quelli artificiali riportati nell'EC8.⁸

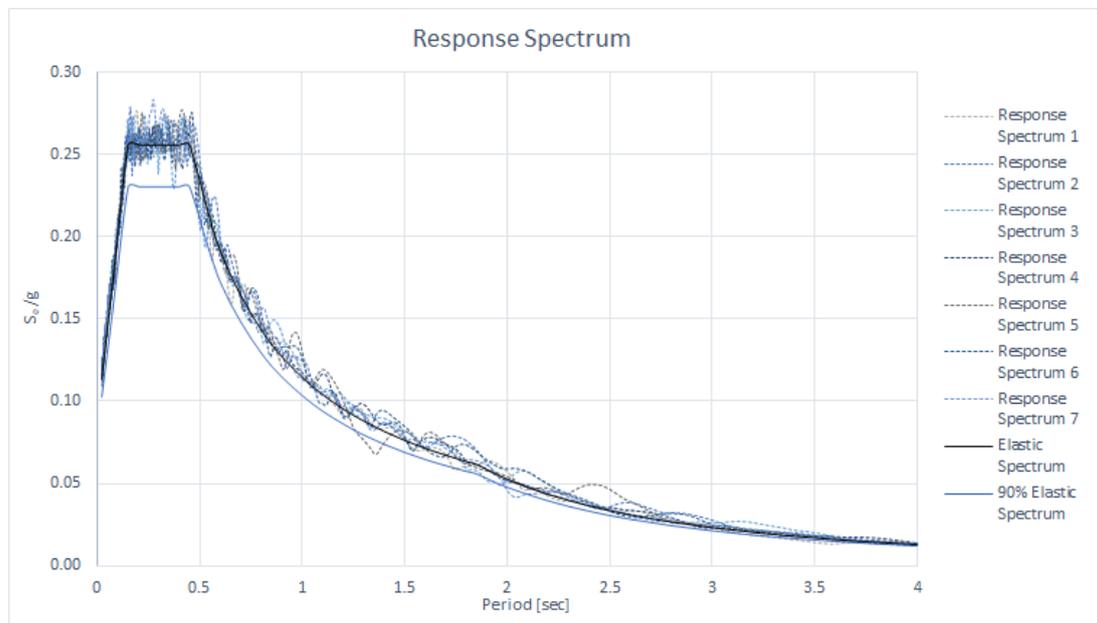


Figura 4.2: Spettrocompatibilità dei sette segnali utilizzati.

La verifica dell'efficacia della strategia di miglioramento viene effettuata procedendo con analisi dinamiche di tipo time-history per via dell'azione sismica sulle due configurazioni del caso studio: il Salone C allo stato di fatto (Undamped) e dopo l'introduzione dei dissipatori (Damped).

⁶NTC 2008, paragrafo §7.3.5

⁷D. Gasparini, E.H. Vanmarcke, SIMQKE: A PROGRAM FOR ARTIFICIAL MOTION GENERATION, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1976.

⁸EC8, paragrafo §3.2.3.1.2

In entrambi i casi, il tipo di analisi utilizzata in ANSYS è quella di tipo "Transient", che è stata svolta con i seguenti accorgimenti:

- i sette segnali sismici artificiali sono stati applicati alla base della struttura;
- poiché il tipo di analisi proposto in ANSYS non permette di applicare dati rappresentanti l'accelerazione del suolo in funzione del tempo, ma solamente dati di spostamento in funzione del tempo, è stata applicata una doppia integrazione ai sette accelerogrammi artificiali generati ed è stata verificata utilizzando il programma SEISMOSIGNAL (v. 2016).

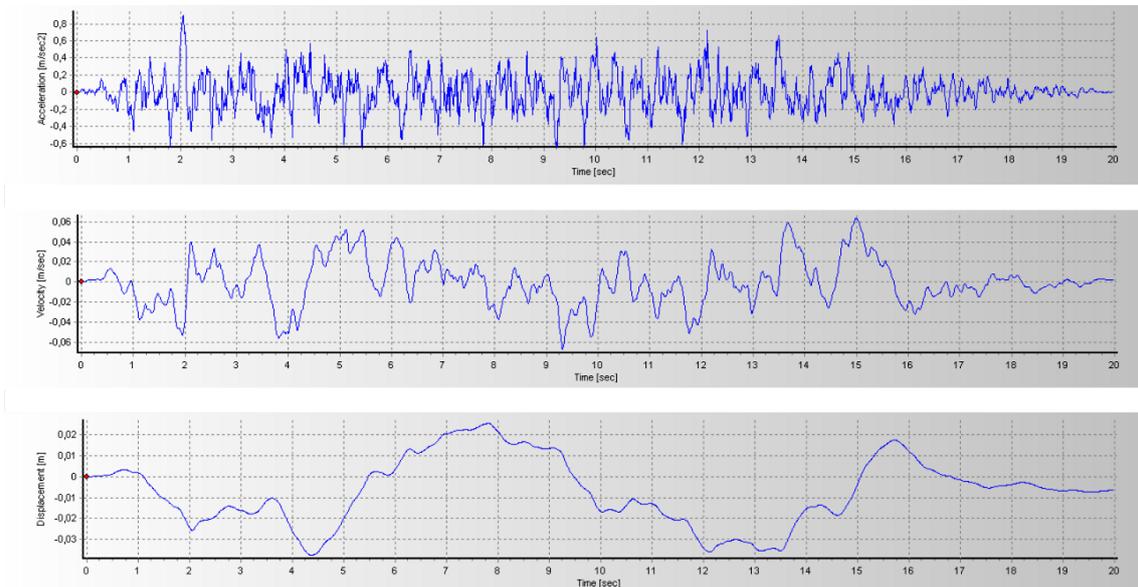
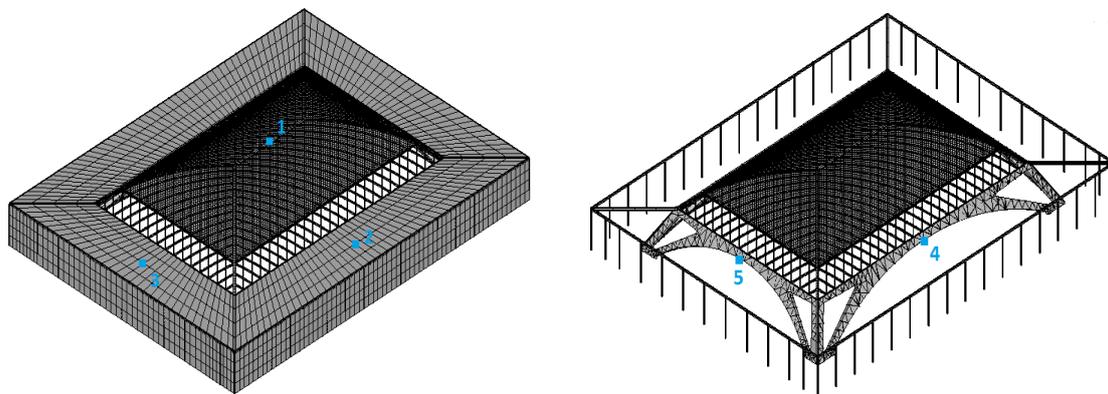


Figura 4.3: Esempio di integrazione doppia sull'accelerogramma n.1 sviluppata da SEISMOSIGNAL.

Dopo aver svolto le due analisi, si verificano gli spostamenti di alcuni nodi significativi della struttura scelti come punti di controllo, al fine di semplificare e velocizzare la fase successiva di verifica:

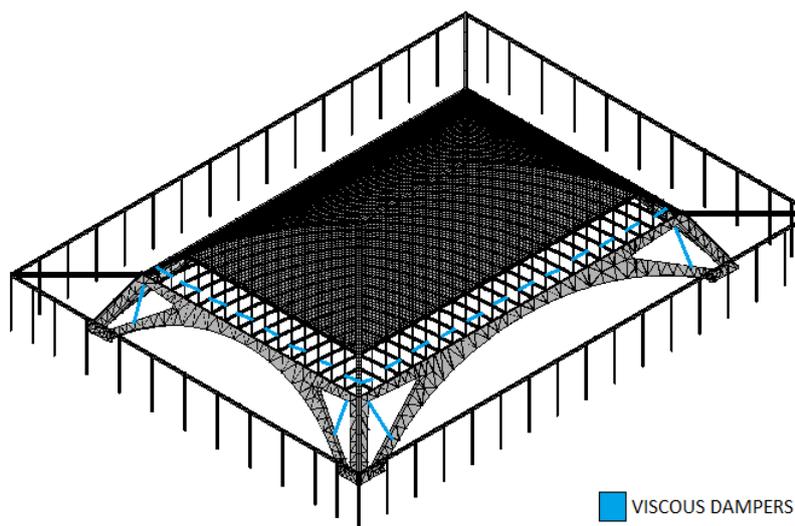
- 1: punto sommitale della volta a padiglione;
- 2: punto centrale del solaio sul lato lungo;
- 3: punto centrale del solaio sul lato corto;
- 4: punto di mezzeria dell'arco sul lato lungo;
- 5: punto di mezzeria dell'arco sul lato corto.

Figura 4.4: *Punti di controllo.*

Analisi dei risultati

I sette segnali artificiali sono stato applicati su entrambi i modelli agli elementi finiti (struttura allo stato di fatto e struttura con aggiunta di dissipatori). Sono state svolte diverse analisi per ricercare la distribuzione funzionale dei dissipatori all'interno della struttura. Il metodo iterativo scelto si basa sul far variare il numero di dissipatori introdotti nella volta a padiglione, lasciando invariato invece quello negli archi.

In seguito a diverse analisi svolte, si è raggiunta una soluzione ottimale nella quale sono stati introdotti un numero complessivo di dissipatori pari a 48, di cui 8 negli archi e 40 nella parte libera delle nervature della volta (fig. 4.5). In questo caso si può constatare che la media degli spostamenti massimi ottenuti risulta ridotta significativamente in direzione x e y nel caso di struttura con aggiunta di dissipatori (fig. 4.6).

Figura 4.5: *Posizionamento dei dispositivi a fluido viscoso nella struttura.*

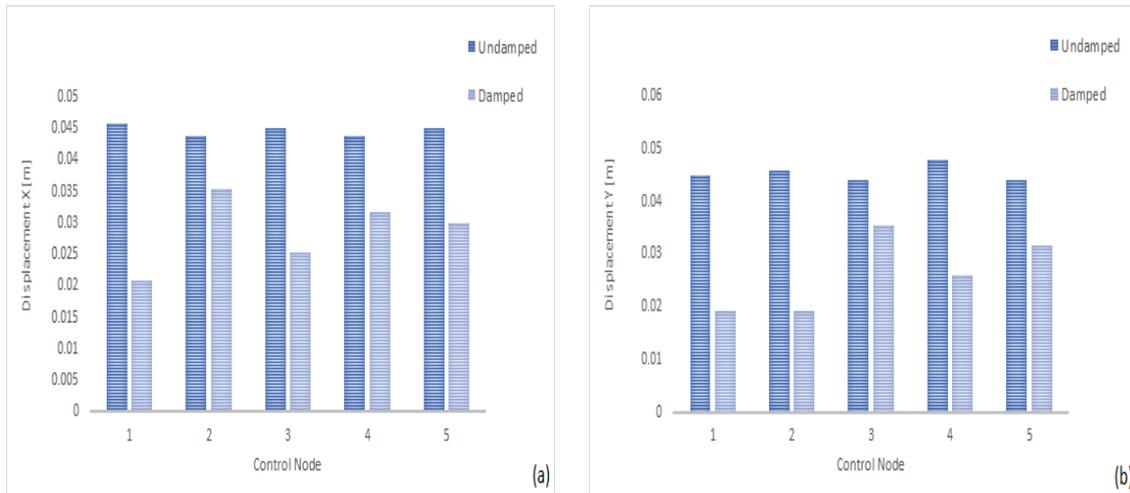


Figura 4.6: Verifica della media degli spostamenti massimi: (a) in direzione x; (b) in direzione y.

Si riporta a titolo esemplificativo (dalla figura 4.7 alla figura 4.11) solo il confronto degli spostamenti in direzione x e y ottenuti per i cinque punti di controllo per l'applicazione del primo dei sette segnali.

Si nota come gli spostamenti dei cinque punti di controllo sono ridotti nelle direzioni x e y. Si può affermare che complessivamente l'intervento apporti dei miglioramenti in tutte le parti della struttura (volta a padiglione, archi, solai).

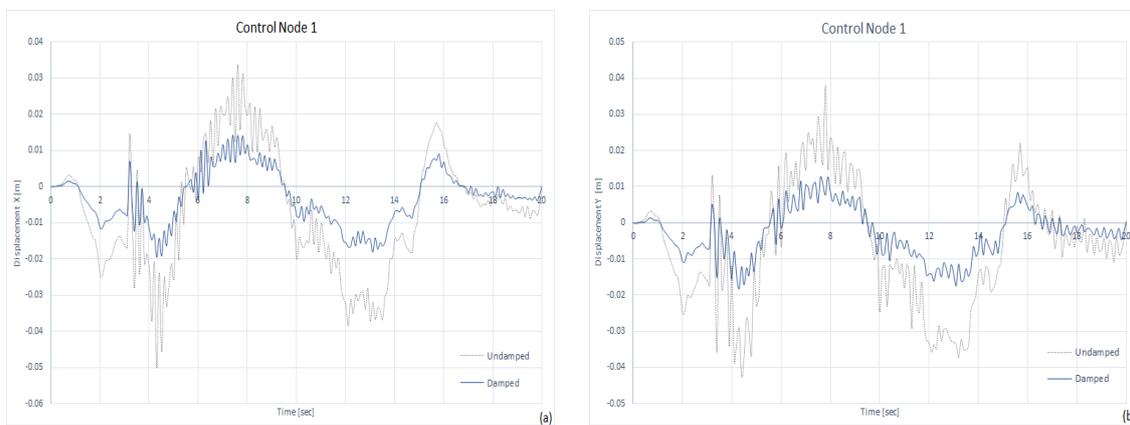


Figura 4.7: Confronto degli spostamenti - punto di controllo 1: (a) in direzione x; (b) in direzione y.

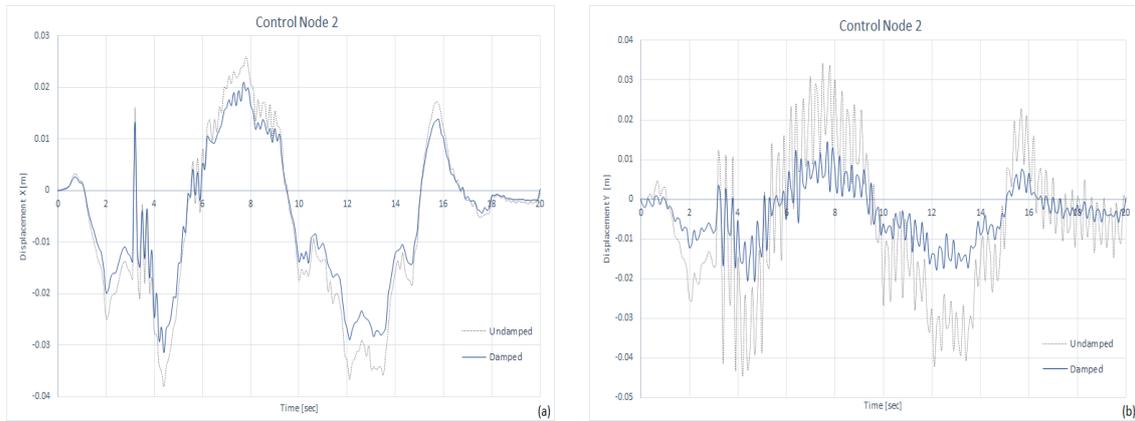


Figura 4.8: Confronto degli spostamenti - punto di controllo 2: (a) in direzione x ; (b) in direzione y .

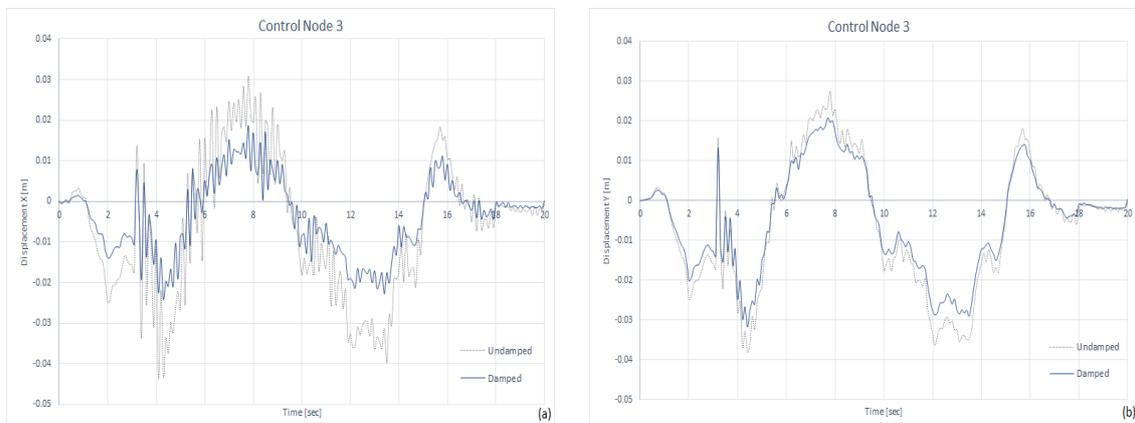


Figura 4.9: Confronto degli spostamenti - punto di controllo 3: (a) in direzione x ; (b) in direzione y .

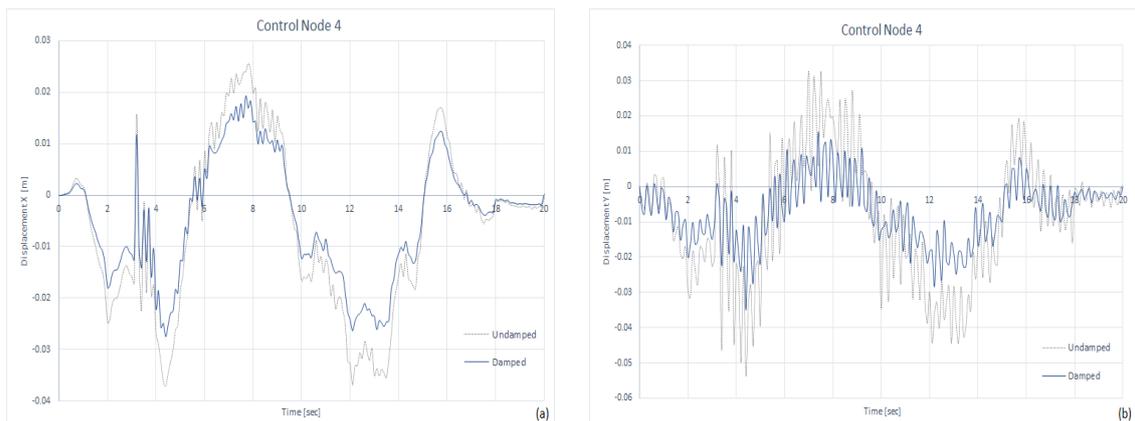


Figura 4.10: Confronto degli spostamenti - punto di controllo 4: (a) in direzione x ; (b) in direzione y .

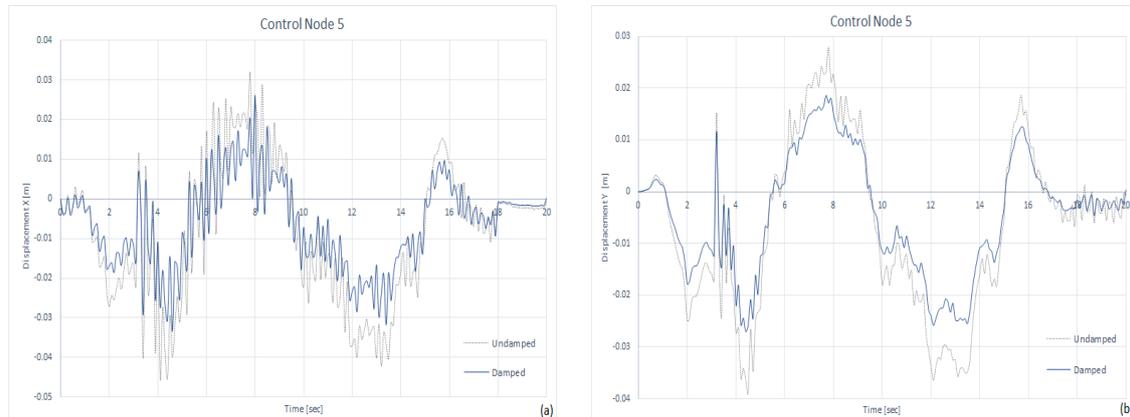
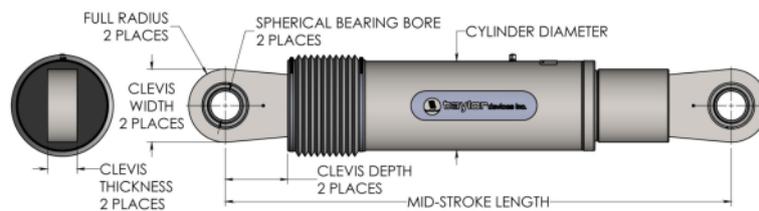


Figura 4.11: Confronto degli spostamenti - punto di controllo 5: (a) in direzione x; (b) in direzione y.

4.1.5 Confronto dei dati progettuali dei dispositivi a fluido viscoso con i prodotti commerciali

In seguito all'analisi time-history svolta, è stato possibile valutare le forze di smorzamento F_d sviluppate nei dispositivi a fluido viscoso con i dati commerciali della scheda tecnica della Taylor Devices, Inc. Prendendo in considerazione il valore massimo ottenuto di 200 kN, i dati del modello n. 17120 sono quelli più conformi al caso in esame.

Per quanto riguarda il parametro intrinseco dei dispositivi C (costante di smorzamento), esso si può variare attraverso l'uso di particolari fluidi siliconici e l'adozione di opportuni circuiti idraulici (valvole) per ottenere il comportamento desiderato. In figura 4.12 si riportano lo schema costruttivo e i dati tecnici del modello scelto.



FORCE (kN)	TAYLOR DEVICES MODEL NUMBER	SPHERICAL BEARING BORE DIAMETER (mm)	MID-STROKE LENGTH (mm)	STROKE (mm)	CLEVIS THICKNESS (mm)	BEARING THICKNESS (mm)	MAXIMUM CLEVIS WIDTH (mm)	CLEVIS DEPTH (mm)	MAXIMUM CYLINDER DIAMETER (mm)	WEIGHT (kg)
250	17120	38.10	867	±75	43	33	100	83	114	41
500	17130	50.80	1067	±100	55	44	127	102	150	82
750	17140	57.15	1194	±100	59	50	155	129	184	136
1000	17150	69.85	1238	±100	71	61	185	150	210	193
1500	17160	76.20	1315	±100	77	67	205	162	241	250
2000	17170	88.90	1575	±125	91	78	235	191	285	408
3000	17180	101.60	1575	±125	142/117*	89	325/286*	210	350	705
4000	17190	127.00	1880	±125	142	111	325	210	425	1202
6500	17200	152.40	2134	±125	154	121	350	305	515	1880
8000	17210	177.80	2242	±125	178	135	415	317	565	2495

Figura 4.12: Scheda tecnica dei dispositivi a fluido viscoso della Taylor Devices Inc.

4.1.6 Proposta di inserimento dei dispositivi a fluido viscoso

In seguito alla scelta di una tipologia di dispositivo presente in commercio, si è deciso di ipotizzare una possibile modalità di inserimento all'interno della struttura. I dissipatori sono collegati mediante un fissaggio a bulloni nella cerniera del sistema costruttivo a dei cavi in acciaio. Tali cavi terminano con un bloccaggio in piastre metalliche, le quali sono sagomate seguendo il profilo delle zone in cui andranno fissate. Infine, queste ultime sono fissate alla struttura tramite dei bulloni.

La modalità descritta è utilizzata sia per i dispositivi inseriti nelle parti angolari degli archi che nella parte libera delle nervature della volta a padiglione.

Si nota che l'impatto visivo generale dei dispositivi sulla struttura è minimo (fig. 4.13).

In figura 4.14 e 4.15 si riportano possibili soluzioni di inserimento dei dissipatori negli archi e tra le nervature libere della volta.

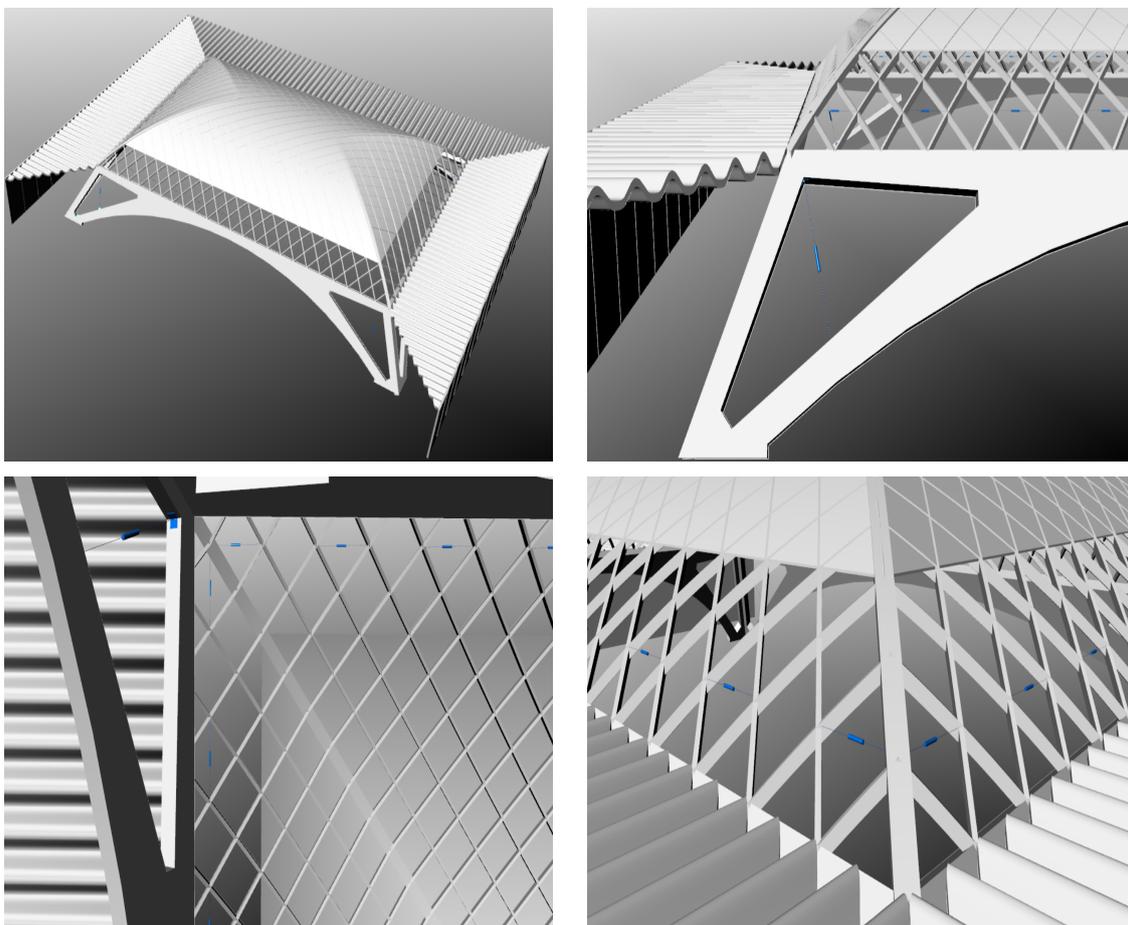


Figura 4.13: *Struttura con inserimento dei dissipatori.*

4.2 Conclusioni

La strategia di miglioramento sismico applicata al caso studio del Salone C del Palazzo delle Esposizioni di Torino ha ottenuto dei risultati complessivamente positivi.

Lo scopo della tesi, cioè quello di migliorare il comportamento sismico della struttura mediante l'utilizzo della tecnica di dissipazione dell'energia, è stato raggiunto tenendo sempre in considerazione l'adattabilità dell'intervento su un edificio di carattere storico-monumentale, poiché l'architettura del XX secolo è entrata a far parte a pieno titolo nell'ambito disciplinare della conservazione. La presa di coscienza dell'importanza della conservazione rende il lavoro svolto attuale e di interesse per un ampliamento a futuri casi di studio su strutture voltate simili a quella analizzata.

La fase di analisi sviluppata sul Salone C potrà essere approfondita, cercando di ottimizzare ulteriormente il posizionamento e il numero di dispositivi a fluido viscoso introdotti nella struttura, nell'ottica di simulare un progetto esecutivo. In tal caso, si dovrà porre maggiore attenzione alla scelta di dispositivi conformi a quelli presenti in commercio e alla fase progettuale della valutazione della modalità di installazione degli stessi.

Una soluzione possibile potrebbe essere quella di prevedere una installazione dei dispositivi combinata, in modo da ovviare al problema di un eventuale non funzionamento di uno dei due. Inoltre, dovranno essere fatte delle verifiche sul calcestruzzo in prossimità dei punti di fissaggio delle piastre dei dispositivi, in quanto potrebbero verificarsi situazioni di incrementi significativi delle tensioni.

Il lavoro svolto ha permesso di approcciarsi al delicato e attuale tema del miglioramento sismico sull'esistente ed, in particolare, su edifici a carattere storico-monumentale, con criterio e attenzione alle problematiche del caso. Ha permesso, inoltre, una conoscenza approfondita dei sistemi di dissipazione dell'energia e di affrontare una progettazione semplificata dei dispositivi a fluido viscoso applicata al caso studio.

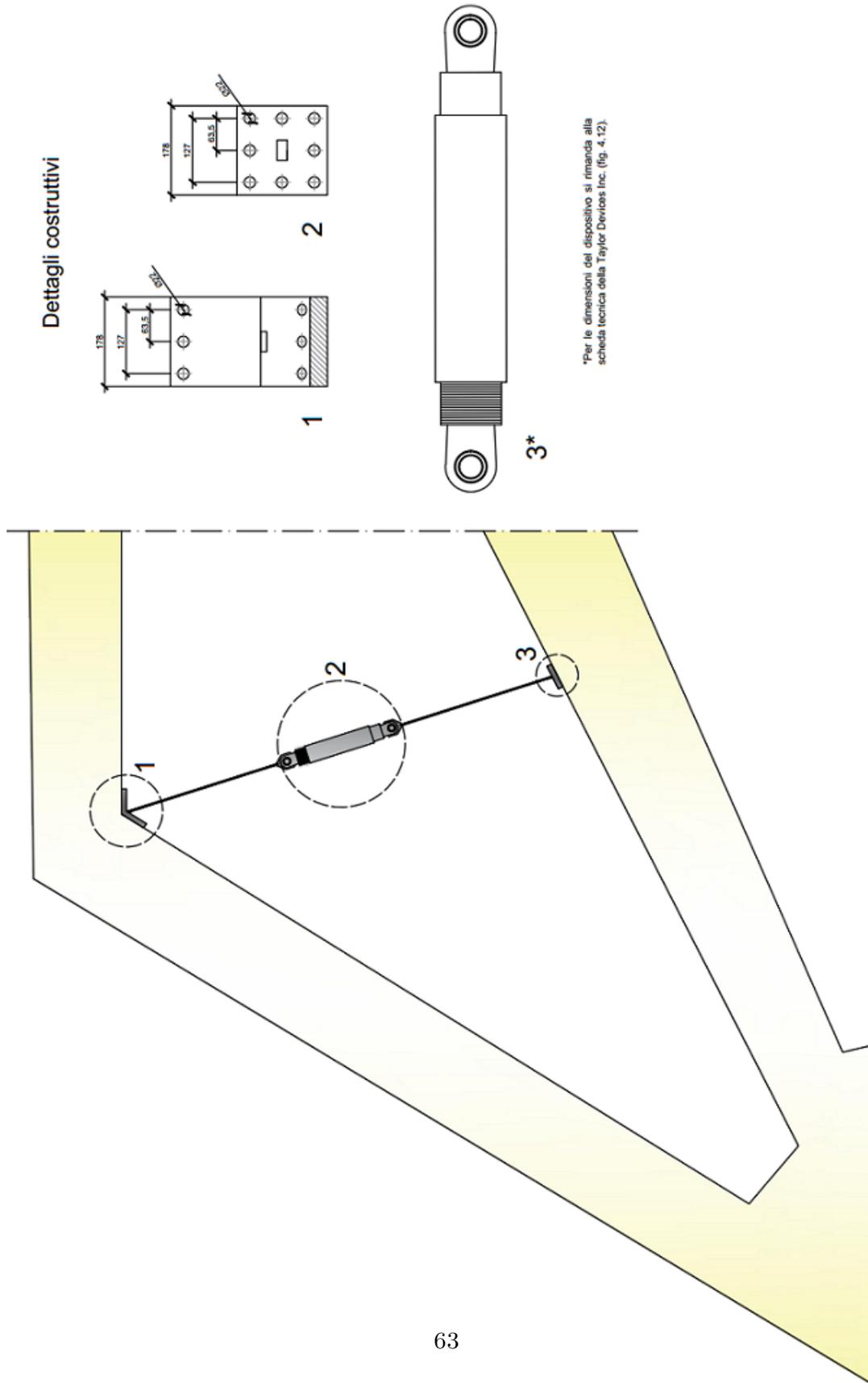
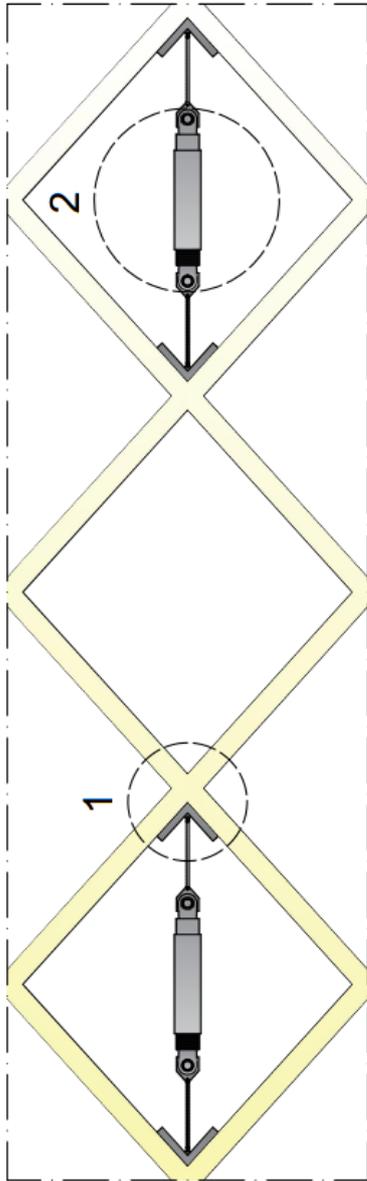
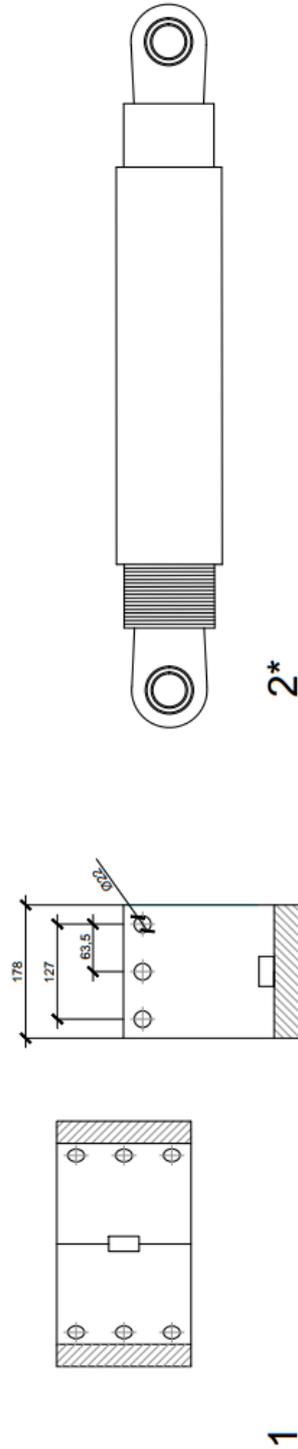


Fig. 4.14. Schema costruttivo per l'inserimento del dissipatore nell'arco.



Dettagli costruttivi



*Per le dimensioni del dispositivo si rimanda alla scheda tecnica della Taylor Devices Inc. (fig. 4.12).

Fig. 4.15: Schema costruttivo per l'inserimento del dissipatore tra le nervature.

Bibliografia

A. Dellavalle, SULLA PROGETTAZIONE IN ZONA SISMICA DI STRUTTURE DOTATE DI DISSIPATORI FLUIDO-VISCOSI:PROPOSTA DI UNA METODOLOGIA, relatore prof. E. Viola Dottorato di ricerca in meccanica delle strutture, XX ciclo, Università di Bologna, 2008.

A. Giuffrè, MONUMENTI E TERREMOTI - Aspetti statici del restauro, Multigrafica Editrice, 1988.

C. Greco, THE "FERROCEMENTO" OF PIER LUIGI NERVI, THE NEW MATERIAL AND THE FIRST EXPERIMENTAL BUILDING, University of Rome Tor Vergata.

C. Greco, PIER LUIGI NERVI Dai primi brevetti al Palazzo delle Esposizioni di Torino 1917-1948, Quart Verlag ed., Lucern 2008.

C. Olmo, C. Chiorino, PIER LUIGI NERVI L'ARCHITETTURA COME SFIDA, Silvana Editoriale, Milano 2010.

C. Pasquin, N. Leboeuf, R.T. Pall, A. Pall, FRICTION DAMPERS FOR SEISMIC REHABILITATION OF EATON'S BUILDING,MONTREAL, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, 2004.

D. Gasparini, E.H. Vanmarcke, SIMQKE: A PROGRAM FOR ARTIFICIAL MOTION GENERATION, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1976.

D.P.Taylor, DAMPER RETROFIT OF THE LONDON MILLENIUM FOOTBRIDGE, Taylor Devices, Inc., 2002.

D. P. Taylor, BUILDINGS: DESIGN FOR DAMPING, Taylor Devices Inc., July 1999.
E. Palazzotto, IL RESTAURO DEL MODERNO IN ITALIA E IN EUROPA, Franco Angeli Edizioni.

F. Clementi, V. Gazzani, M. Poiani and S. Lenci, ASSESSMENT OF SEISMIC BEHAVIOUR OF HERITAGE MASONRY BUILDINGS USING NUMERICAL MODELLING, Journal of Building Engineering.

F.C. Ponzo, A. Di Cesare, D. Nigro, TECNICHE INNOVATIVE DI ADEGUAMENTO SISMICO DI EDIFICI ESISTENTI - Recenti indagini sperimentali condotte dall'Università degli Studi della Basilicata.

E. Lenticchia, R. Ceravolo, C. Chiorino, DAMAGE SCENARIO-DRIVEN STRATEGIES FOR THE SEISMIC MONITORING OF XX CENTURY SPATIAL STRUCTURES WITH APPLICATION TO PIER LUIGI'S TURIN EXHIBITION CENTRE, Engineering Structures 137, 2017, p. 256–267.

F. Antonucci, POSIZIONAMENTO OTTIMALE DI SENSORI NEL CAMPO DEI BENI ARCHITETTONICI DEL XX SECOLO: IL SALONE C-PALAZZO DELLE ESPOSIZIONI DI TORINO, relatori R. Ceravolo e E. Lenticchia, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Politecnico di Torino, Ottobre 2015.

G.R. Searer, T. F. Paret, S. A. Freeman - Wiss, Janney, Elstner Associates, Inc. - ASCE-31 and ASCE-41: What Good Are They?

G. Tampone, N. Ruggieri, STRUCTURAL INVENTION AND PRODUCTION PROCESS IN THE PIER LUIGI'S WORK, Proceedings of the First International Congress on Construction History, January 2003.

J.F. Abel, G. Arun, M.A. Chiorino, PIER LUIGI NERVI: ART AND TECHNOLOGY IN BUILDING, Journal of the international association for shell and spatial structures, Vol.54 Nos. 2 & 3, n. 176 & 177, September 2013.

Junbo Jia, MODERN EARTHQUAKE ENGINEERING - Offshore and Land-based Structures, Springer, 2017.

J.K. Whittle, STRATEGIC PLACEMENT OF VISCOUS DAMPERS FOR SEISMIC STRUCTURAL DESIGN, Department of Engineering Science, University of Oxford, 2011.

L. De Stefani, TECNICHE INNOVATIVE PER IL MIGLIORAMENTO SISMICO DI EDIFICI STORICO-MONUMENTALI, relatore prof. R. Scotta, Dottorato di ricerca in scienze dell'ingegneria civile ed ambientale, XXIV ciclo, Università degli studi di Padova, 2012.

M.D. Symans, F.A. Charmey, A.S. Whittaker, M.C. Constantinou, C.A. Kircher, M.W. Johnson, R.J. McNamara, ENERGY DISSIPATION SYSTEMS FOR SEISMIC APPLICATIONS: CURRENT PRACTICE AND RECENT DEVELOPMENTS.

R. Strassoldo, LE CARTE DEL RESTAURO. I CRITERI PER GLI INTERVENTI DI RECUPERO DEI BENI ARCHITETTONICI, Forum Edizioni, 2007.

M.G. Castellano, G. Tosti, G.P. Bolletti, M. Tosti, FLUID SPRING DAMPERS FOR THE SEISMIC PROTECTION OF THE CATHEDRAL OF SIENA, Protection of Historical Buildings, PROHITECH 09 - Mazzolani Ed., 2009.

O.M. Ramirez, M.C. Constantinou, EVALUATION OF SIMPLIFIED METHODS OF ANALYSIS OF YIELDING STRUCTURES WITH DAMPING SYSTEMS, Earthquake Spectra, 18(3), p.501-530, 2002.

P.L. Nervi, COSTRUIRE CORRETTAMENTE, Hoepli, Milano 1965.

P.L. Nervi, LA STRUTTURA PORTANTE DEL NUOVO SALONE DEL PALAZZO DI TORINO ESPOSIZIONI, Atti e rassegna tecnica della soc. degli ingegneri e architetti in Torino- N.S- A.IV- N.1-3-Gennaio-Marzo 1950.

P. Napoli, TIENE BENE IL FERROCEMENTO, in "Il Giornale dell'Architettura", n. 13, 2003.

W. Salvatore, INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO SISMICO CON SISTEMI DI ISOLAMENTO ALLA BASE O SISTEMI DISSIPATIVI, Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale - Università di Pisa, 2014.

W. Salvatore, DISPOSITIVI STRUTTURALI ANTISISMICI, Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale - Università di Pisa, 2014.

Normativa

D.M. 14 Gennaio 2008, Norme tecniche per le costruzioni (NTC 2008).

D.P.R. 6 giugno 2001, n. 380, Testo unico in materia di edilizia.

D.Lgs. 22 gennaio 2004, n. 42, Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'art. 10 della legge 6 luglio 2000, n. 137.

UNI EN 1998, Progettazione delle strutture per la resistenza sismica (EC8).

Direttiva P.C.M. del 12 ottobre 2007 per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale (LGBC 2007).

FEMA 273-SEISMIC REHABILITATION GUIDELINES, Chapter 9: Seismic Isolation and Energy Dissipation (Systematic Rehabilitation).

FEMA 356 - PRESTANDARD AND COMMENTARY FOR SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS, November 2000

NEHRP 2000 (Recommended Provisions for Seismic Regulation for new buildings and other structures - FEMA 450).

Sitografia

(aggiornata ad ottobre 2017)

<http://biblus.acca.it/>

<https://it.pinterest.com/>

<https://strutturisti.wordpress.com/>

<http://www.costruirecorrettamente.org>

<http://www.edilportale.com/>

<https://www.espazium.ch>

<http://www.museotorino.it/>

<http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/classificazione.wp>

<http://www.torinostoria.com/>

<http://zonesismiche.mi.ingv.it/>

Allegati

A.1 Listato ANSYS per la creazione del modello FEM

```
/PREP7

!NERVATURE
~PARAIN,'Nervature','x_t','.\Elementi padiglione\','ALL,0,0
FLST,5,1490,4,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-1490
LSEL,R, , ,P51X
CM,NERVATURE,LINE

!TRAVI_DIAGONALI
~PARAIN,'TraviDiagonali','x_t','.\Elementi padiglione\','ALL,0,0
FLST,5,64,4,ORDE,2
FITEM,5,1491
FITEM,5,-1554
LSEL,R, , ,P51X
CM,TRAVIDIAGONALI,LINE

!TRAVI_PERIMETRALI
~PARAIN,'TraviPerimetrali','x_t','.\Elementi padiglione\','ALL,0,0
FLST,5,68,4,ORDE,2
FITEM,5,1555
FITEM,5,-1622
LSEL,R, , ,P51X
CM,TRAVIPERIMETRALI,LINE

!TRAVE_SUPERIORE
~PARAIN,'TraveSuperiore','x_t','.\Elementi padiglione\','ALL,0,0
FLST,5,8,4,ORDE,2
FITEM,5,1623
FITEM,5,-1630
LSEL,R, , ,P51X
```

CM,TRAVESUPERIORE,LINE

!TRAVI_PERIMETRO

~PARAIN,'TraviPerimetro','x_t','.\Elementi padiglione\ ',ALL,0,0

FLST,5,4,4,ORDE,2

FITEM,5,1631

FITEM,5,-1634

LSEL,R, , ,P51X

CM,TRAVIPERIMETRO,LINE

!ARCONI

~PARAIN,'Arconi','x_t','.\Elementi padiglione\ ',ALL,0,0

FLST,5,4,5,ORDE,2

FITEM,5,1

FITEM,5,-4

ASEL,R, , ,P51X

CM,ARCONI,AREA

!SOLAIO_PIANO

~PARAIN,'Solaio','x_t','.\Elementi padiglione\ ',ALL,0,0

FLST,5,4,5,ORDE,2

FITEM,5,5

FITEM,5,-8

ASEL,R, , ,P51X

CM,SOLAIO,AREA

!TAVELLONI_VOLTA

~PARAIN,'Tavelloni','x_t','.\Elementi padiglione\ ',ALL,0,0

FLST,5,580,5,ORDE,2

FITEM,5,9

FITEM,5,-588

ASEL,R, , ,P51X

CM,TAV_VOLTA,AREA

!TRAVI_ESTERNE

~PARAIN,'TraviEsterne','x_t','.\Elementi padiglione\ ',ALL,0,0

FLST,5,4,4,ORDE,2

FITEM,5,3976

FITEM,5,-3979

LSEL,R, , ,P51X

CM,TRAVIESTERNE,LINE

!PILASTRINI

~PARAIN,'Pilastrini','x_t','.\Elementi padiglione\ ',ALL,0,0

```
FLST,5,56,4,ORDE,2
FITEM,5,3980
FITEM,5,-4035
LSEL,R, , ,P51X
CM,PILASTRI,LINE
```

```
!MURI_PERIMETRALI
~PARAIN,'Muri','x_t','.\Elementi padiglione\ ',ALL,0,0
FLST,5,56,5,ORDE,2
FITEM,5,589
FITEM,5,-644
ASEL,R, , ,P51X
CM,MURI,AREA
```

```
!TRAVI_SPIGOLO
~PARAIN,'TraviSpigolo','x_t','.\Elementi padiglione\ ',ALL,0,0
FLST,5,4,4,ORDE,2
FITEM,5,4260
FITEM,5,-4263
LSEL,R, , ,P51X
CM,TRAVISPIGOLO,LINE
```

```
!TRAVI_ANGOLO
PARAIN,'TraviAngolo','x_t','.\Elementi padiglione\ ',ALL,0,0
FLST,5,4,4,ORDE,2
FITEM,5,4264
FITEM,5,-4267
LSEL,R, , ,P51X
CM,TRAVIANGOLO,LINE
```

```
!Vertical axis is Z
/VUP, 1, Z
```

```
!Definizione degli ELEMENT TYPES
ET,1,SHELL181
ET,2,BEAM188
```

```
!Definizione dei materiali:
!TRAVI IN CA
!Origin Material Property ID - 1
MP,EX,1,3E10
MP,NUXY,1,0.2
MP,DENS,1,2500
```

!ARCHI IN CA

!Origin Material Property ID - 2

MP,EX,2,3E10

MP,NUXY,2,0.2

MP,DENS,2,2500

!FERROCEMENTO

!Origin Material Property ID - 3

MP,EX,3,2.608E10

MP,NUXY,3,0.2

MP,DENS,3,2200

!MURATURA

!Origin Material Property ID - 4

MP,EX,4,2E9

MP,NUXY,4,0.2

MP,DENS,4,1100

!Definizione delle sezioni:

!SEZIONI Beam

SECTYPE,1,BEAM,RECT,NerviSup

SECDATA,0.6,0.25,0,0,0,0,0,0,0

SECOFFSET,CENT

SECTYPE,2,BEAM,RECT,NerviDiag

SECDATA,0.4,0.25,0,0,0,0,0,0,0

SECOFFSET,CENT

SECTYPE,3,BEAM,QUAD,Perimetrale

SECDATA,0,0,0.454,-0.2544,0.1529,0.0441,0.0298,0.0414,0,0

SECOFFSET,USER, 0.2309, -0.13816

SECTYPE,4,BEAM,RECT,NerviTrasv

SECDATA,0.11,0.25,0,0,0,0,0,0,0

SECOFFSET,CENT

SECTYPE,5,BEAM,RECT,TraviSpigolo

SECDATA,0.4,0.3,0,0,0,0,0,0,0

SECOFFSET,CENT

SECTYPE,6,BEAM,RECT,TraviEsterne

SECDATA,0.15,0.35,0,0,0,0,0,0,0

SECOFFSET,CENT

```
SECTYPE,7,BEAM,RECT,Pilastro
SECDATA,0.15,0.15,0,0,0,0,0,0,0
SECOFFSET,CENT
```

```
SECTYPE,8,BEAM,RECT,TraviAngolo
SECDATA,0.4,0.8,0,0,0,0,0,0,0
SECOFFSET,CENT
```

```
!SEZIONI Shell
```

```
SECTYPE,9,SHELL,,Arco
SECDATA,0.6,2,0,0,5
SECOFFSET,MID
SECCONTROL,, , ,
```

```
SECTYPE,10,SHELL,,Solaio__onde
SECDATA,0.20,3,0,3
SECOFFSET,MID
SECCONTROL,0,0,0,0,1,1,1
```

```
SECTYPE,11,SHELL,,Muri__perimetrali
SECDATA,0.2,1,0,3
SECOFFSET,MID
SECCONTROL,0,0,0,0,1,1,1
```

```
SECTYPE,12,SHELL,,Tav__Volta
SECDATA,0.04,3,0,3
SECOFFSET,MID
SECCONTROL,0,0,0,0,1,1,1
```

```
!Merge coincident or equivalently defined items:
```

```
!for nodes:
```

```
/NUMMRG,NODE, , , ,LOW
```

```
!for Keypoints (will also merge lines, areas, and volumes):
```

```
/NUMMRG,KP, , , ,LOW
```

```
!Definizione di materiale e sezione per tutti i CM
```

```
CMSEL,S,NERVATURE
```

```
LATT,1,,2,,4
```

```
CMSEL,S,TRAVIDIAGONALI
```

```
LATT,1,,2,,2
```

CMSEL,S,TRAVIPERIMETRALI
LATT,1,,2,,4

CMSEL,S,TRAVESUPERIORE
LATT,1,,2,,1

CMSEL,S,TRAVIPERIMETRO
LATT,1,,2,,3

CMSEL,S,ARCONI
AATT,2,0,1,0,9

CMSEL,S,TAV_ VOLTA
AATT,3,0,1,0,12

CMSEL,S,SOLAIO
AATT,3,0,1,0,10

CMSEL,S,TRAVIESTERNE
LATT,1,,2,,6

CMSEL,S,PILASTRI
LATT,1,,2,,7

CMSEL,S,MURI
AATT,4,0,1,0,11

CMSEL,S,TRAVISPIGOLO
LATT,1,,2,,5

CMSEL,S,TRAVIANGOLO
LATT,1,,2,,8

!!!MESH!!!

A.2 Listato ANSYS per la creazione del modello FEM con dissipatori

!Inserimento nuove linee tra le nervature libere

L, 888, 1819
L, 1753, 1727
L, 920, 894
L, 822, 824
L, 829, 784
L, 776, 585
L, 574, 475
L, 428, 394
L, 366, 324
L, 326, 309
L, 308, 314
L, 317, 632
L, 2986, 1
L, 5, 13
L, 19, 23
L, 31, 41
L, 1881, 1883
L, 1901, 1907
L, 1915, 1945
L, 1963, 45
L, 2977, 617
L, 637, 686
L, 698, 717
L, 1117, 1141
L, 1345, 1421
L, 1447, 1471
L, 1485, 1501
L, 1519, 295
L, 2983, 291
L, 277, 268
L, 264, 242
L, 236, 225
L, 220, 213
L, 198, 186
L, 169, 156
L, 141, 123
L, 111, 97
L, 83, 78
L, 56, 50
L, 44, 2982

!Inserimento nuove linee tra gli archi

KNODE,0, 6678
L, 3308, 4
KNODE,0, 6660
L, 3307, 6
KNODE,0, 6591
L, 3289, 7
KNODE,0, 6575
L, 3288, 8
KNODE,0, 6489
L, 3270, 9
KNODE,0, 6502
L, 3271, 12
KNODE,0, 6765
L, 3326, 14
KNODE,0, 6746
L, 3325, 15

!Definizione CM=DISSIPATORI

FLST,5,48,4,ORDE,27
FITEM,5,211
FITEM,5,1052
FITEM,5,1054
FITEM,5,1062
FITEM,5,1064
FITEM,5,1072
FITEM,5,1106
FITEM,5,1110
FITEM,5,1114
FITEM,5,1168
FITEM,5,1170
FITEM,5,1217
FITEM,5,1221
FITEM,5,1641
FITEM,5,1660
FITEM,5,1678
FITEM,5,-1680
FITEM,5,1695
FITEM,5,-1697
FITEM,5,1711
FITEM,5,-1712
FITEM,5,1715
FITEM,5,-1716

```
FITEM,5,1719
FITEM,5,-1720
FITEM,5,1722
FITEM,5,-1742
LSEL,S, , ,P51X
CM,DISSIPATORI,LINE
```

```
!Agginta ET per i dissipatori
ET,3,COMBIN14
```

```
!Aggiunta RC per COMBIN14
R,1,0,460400,0, , ,0,
RMORE,0,
```

```
!!!MESH!!!
```

A.3 Risultati analisi modale

PARTICIPATION FACTOR CALCULATION - X DIRECTION							
MODE	FREQUENCY [Hz]	PERIOD [s]	PARTICIPATION FACTOR	RATIO (%)	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION (%)	RATIO EFF. MASS TO TOTAL MASS
1	3.388	0.295	-0.058077	0.0005	3.37E-03	1.27E-07	1.30E-09
2	3.754	0.266	-0.12235	0.0010	1.50E-02	6.92E-07	5.77E-09
3	4.568	0.219	0.10174	0.0008	1.04E-02	1.08E-06	3.99E-09
4	4.617	0.217	-0.069022	0.0005	4.76E-03	1.26E-06	1.84E-09
5	4.869	0.205	0.20237	0.0016	4.10E-02	2.81E-06	1.58E-08
6	5.212	0.192	0.15946	0.0013	2.54E-02	3.77E-06	9.80E-09
7	5.660	0.177	-72.661	0.5742	5.28E+03	1.99E-01	2.03E-03
8	5.666	0.176	16.959	0.1340	2.88E+02	2.10E-01	1.11E-04
9	5.857	0.171	5.5743	0.0440	3.11E+01	2.11E-01	1.20E-05
10	5.881	0.170	-69.928	0.5526	4.89E+03	3.96E-01	1.88E-03
11	6.106	0.164	126.55	1	1.60E+04	0.999894	6.17E-03
12	6.250	0.160	0.20014	0.0016	4.01E-02	0.999896	1.54E-08
13	6.554	0.153	0.010836	0.0001	1.17E-04	0.999896	4.52E-11
14	6.638	0.151	1.6477	0.0130	2.72E+00	0.999998	1.05E-06
15	6.661	0.150	0.2072	0.0016	4.29E-02	1	1.65E-08

Tabella A1: Risultati analisi modale, direzione x

PARTICIPATION FACTOR CALCULATION - Y DIRECTION							
MODE	FREQUENCY [Hz]	PERIOD [s]	PARTICIPATION FACTOR	RATIO (%)	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF. MASS TO TOTAL MASS
1	3.388	0.295	0.2316	0.0013	5.36E-02	8.81E-07	2.07E-08
2	3.754	0.266	-70.9	0.4014	5.03E+03	8.26E-02	1.94E-03
3	4.568	0.219	176.63	1	3.12E+04	5.95E-01	1.20E-02
4	4.617	0.217	-2.7356	0.0155	7.48E+00	5.95E-01	2.88E-06
5	4.869	0.205	0.86577	0.0049	7.50E-01	5.95E-01	2.89E-07
6	5.212	0.192	-129.04	0.7306	1.67E+04	0.868738	6.42E-03
7	5.660	0.177	0.26873	0.0015	7.22E-02	0.868739	2.78E-08
8	5.666	0.176	-0.064081	0.0004	4.11E-03	0.868739	1.58E-09
9	5.857	0.171	-1.0088	0.0057	1.02E+00	0.868756	3.92E-07
10	5.881	0.170	3.4432	0.0195	1.19E+01	0.868950	4.57E-06
11	6.106	0.164	-0.46477	0.0026	2.16E-01	0.868954	8.32E-08
12	6.250	0.160	0.19446	0.0011	3.78E-02	0.868955	1.46E-08
13	6.554	0.153	78.704	0.4456	6.19E+03	0.970711	2.39E-03
14	6.638	0.151	42.199	0.2389	1.78E+03	0.999964	6.86E-04
15	6.661	0.150	-1.4796	0.0084	2.19E+00	1	8.43E-07

Tabella A2: Risultati analisi modale, direzione y

PARTICIPATION FACTOR CALCULATION - Z DIRECTION							
MODE	FREQUENCY [Hz]	PERIOD [s]	PARTICIPATION FACTOR	RATIO (%)	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF. MASS TO TOTAL MASS
1	3.388	0.295	-97194	0.1267	9.45E+09	8.75E-03	2.68E-03
2	3.754	0.266	293.89	0.0004	8.64E+04	8.75E-03	2.45E-08
3	4.568	0.219	9102.6	0.0119	8.29E+07	8.83E-03	2.35E-05
4	4.617	0.217	125540	0.1636	1.58E+10	2.34E-02	4.46E-03
5	4.869	0.205	767310	1	5.89E+11	5.69E-01	0.166793
6	5.212	0.192	-524.43	0.0007	2.75E+05	5.69E-01	7.79E-08
7	5.660	0.177	1.5604E+05	0.2034	2.43E+10	5.91E-01	6.90E-03
8	5.666	0.176	6.6025E+05	0.8605	4.36E+11	0.995086	1.23E-01
9	5.857	0.171	4947.4	0.0064	2.45E+07	0.995108	6.93E-06
10	5.881	0.170	-992.32	0.0013	9.85E+05	0.995109	2.79E-07
11	6.106	0.164	-1073.7	0.0014	1.15E+06	0.99511	3.27E-07
12	6.250	0.160	-72288	0.0942	5.23E+09	0.99995	1.48E-03
13	6.554	0.153	-1066.1	0.0014	1.14E+06	0.999951	3.22E-07
14	6.638	0.151	7226.9	0.0094	5.22E+07	1	1.48E-05
15	6.661	0.150	385.77	0.0005	1.49E+05	1	4.22E-08

Tabella A3: Risultati analisi modale, direzione z

A.3 Risultati analisi modale

PARTICIPATION FACTOR CALCULATION - ROTX DIRECTION							
MODE	FREQUENCY [Hz]	PERIOD [s]	PARTICIPATION FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF. MASS TO TOTAL MASS
1	3.388	0.295	-97194	0.1267	9.45E+09	8.75E-03	2.68E-03
2	3.754	0.266	293.89	0.0004	8.64E+04	8.75E-03	2.45E-08
3	4.568	0.219	9102.6	0.0119	8.29E+07	8.83E-03	2.35E-05
4	4.617	0.217	125540	0.1636	1.58E+10	2.34E-02	4.46E-03
5	4.869	0.205	767310	1	5.89E+11	0.568755	0.166793
6	5.212	0.192	-524.43	0.0007	2.75E+05	0.568755	7.79E-08
7	5.660	0.177	156040	0.2034	2.43E+10	0.591306	6.90E-03
8	5.666	0.176	660250	0.8605	4.36E+11	0.995086	0.123499
9	5.857	0.171	4947.4	0.0064	2.45E+07	0.995108	6.93E-06
10	5.881	0.170	-992.32	0.0013	9.85E+05	0.995109	2.79E-07
11	6.106	0.164	-1073.7	0.0014	1.15E+06	0.99511	3.27E-07
12	6.250	0.160	-72288	0.0942	5.23E+09	0.99995	1.48E-03
13	6.554	0.153	-1066.1	0.0014	1.14E+06	0.999951	3.22E-07
14	6.638	0.151	7226.9	0.0094	5.22E+07	1	1.48E-05
15	6.661	0.150	385.77	0.0005	1.49E+05	1	4.22E-08

Tabella A4: Risultati analisi modale, rotazione in direzione x

PARTICIPATION FACTOR CALCULATION - ROTY DIRECTION							
MODE	FREQUENCY [Hz]	PERIOD [s]	PARTICIPATION FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF. MASS TO TOTAL MASS
1	3.388	0.295	2.178E+05	0.1267	4.74E+10	8.75E-03	2.68E-03
2	3.754	0.266	-808.38	0.0005	6.53E+05	8.75E-03	3.69E-08
3	4.568	0.219	-4993	0.0029	2.49E+07	8.76E-03	1.41E-06
4	4.617	0.217	-2.8154E+05	0.1638	7.93E+10	2.34E-02	4.47E-03
5	4.869	0.205	-1.7193E+06	1	2.96E+12	0.568695	1.67E-01
6	5.212	0.192	-10847	0.0063	1.18E+08	0.568716	6.64E-06
7	5.660	0.177	-3.3637E+05	0.1956	1.13E+11	0.589589	6.39E-03
8	5.666	0.176	-1.4826E+06	0.8623	2.20E+12	0.99511	1.24E-01
9	5.857	0.171	-11647	0.0068	1.36E+08	0.995135	7.66E-06
10	5.881	0.170	9059.9	0.0053	8.21E+07	0.99515	4.63E-06
11	6.106	0.164	7114.2	0.0041	5.06E+07	0.99516	2.86E-06
12	6.250	0.160	1.6194E+05	0.0942	2.62E+10	0.999998	1.48E-03
13	6.554	0.153	-3089.5	0.0018	9.54E+06	1	5.39E-07
14	6.638	0.151	844.23	0.0005	7.13E+05	1	4.02E-08
15	6.661	0.150	-1367.1	0.0008	1.87E+06	1	1.05E-07

Tabella A5: Risultati analisi modale, rotazione in direzione y

PARTICIPATION FACTOR CALCULATION - ROTZ DIRECTION							
MODE	FREQUENCY [Hz]	PERIOD [s]	PARTICIPATION FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF. MASS TO TOTAL MASS
1	3.388	0.295	673.05	0.0015	4.53E+05	1.00E-06	2.13E-08
2	3.754	0.266	-1.8509E+05	0.4012	3.43E+10	7.56E-02	1.61E-03
3	4.568	0.219	4.6132E+05	1	2.13E+11	0.545385	1.00E-02
4	4.617	0.217	-7077.5	0.0153	5.01E+07	0.545495	2.36E-06
5	4.869	0.205	1986.9	0.0043	3.95E+06	0.545504	1.86E-07
6	5.212	0.192	-3.373E+05	0.7312	1.14E+11	0.796643	5.35E-03
7	5.660	0.177	85414	0.1852	7.30E+09	0.812747	3.43E-04
8	5.666	0.176	-19953	0.0433	3.98E+08	0.813626	1.87E-05
9	5.857	0.171	-8057.4	0.0175	6.49E+07	0.813769	3.06E-06
10	5.881	0.170	90608	0.1964	8.21E+09	0.831892	3.86E-04
11	6.106	0.164	-1.4876E+05	0.3225	2.21E+10	0.88074	1.04E-03
12	6.250	0.160	257.65	0.0006	6.64E+04	0.88074	3.12E-09
13	6.554	0.153	2.0561E+05	0.4457	4.23E+10	0.974055	1.99E-03
14	6.638	0.151	1.0831E+05	0.2348	1.17E+10	0.999948	5.52E-04
15	6.661	0.150	-4848.8	0.0105	2.35E+07	1	1.11E-06

Tabella A6: Risultati analisi modale, rotazione in direzione z

A.4 Modi significativi

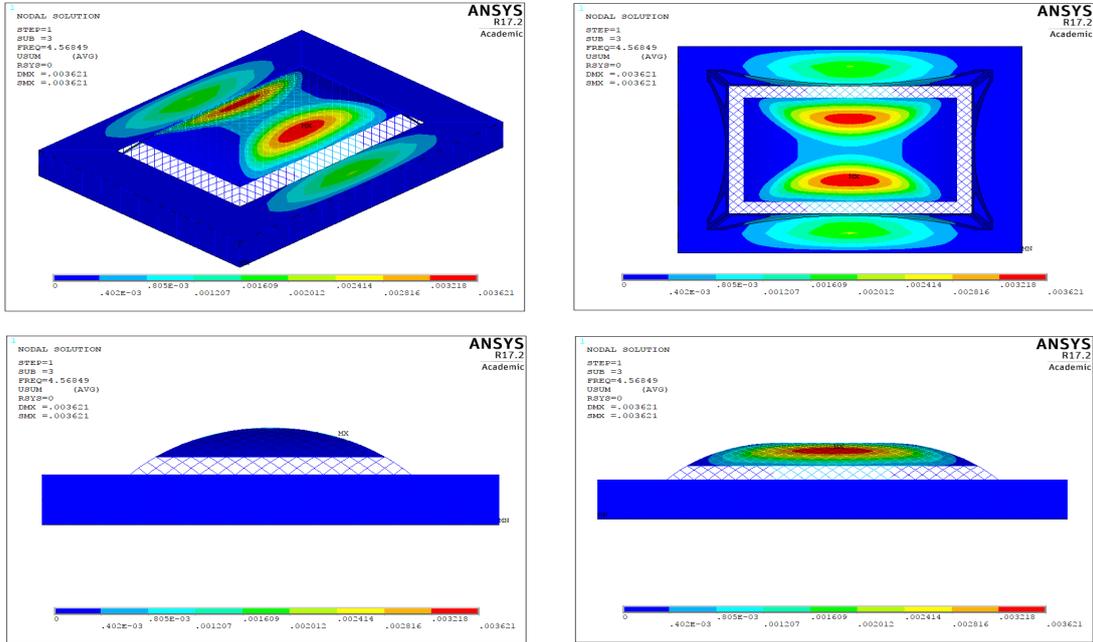


Fig. A1: Modo 3.

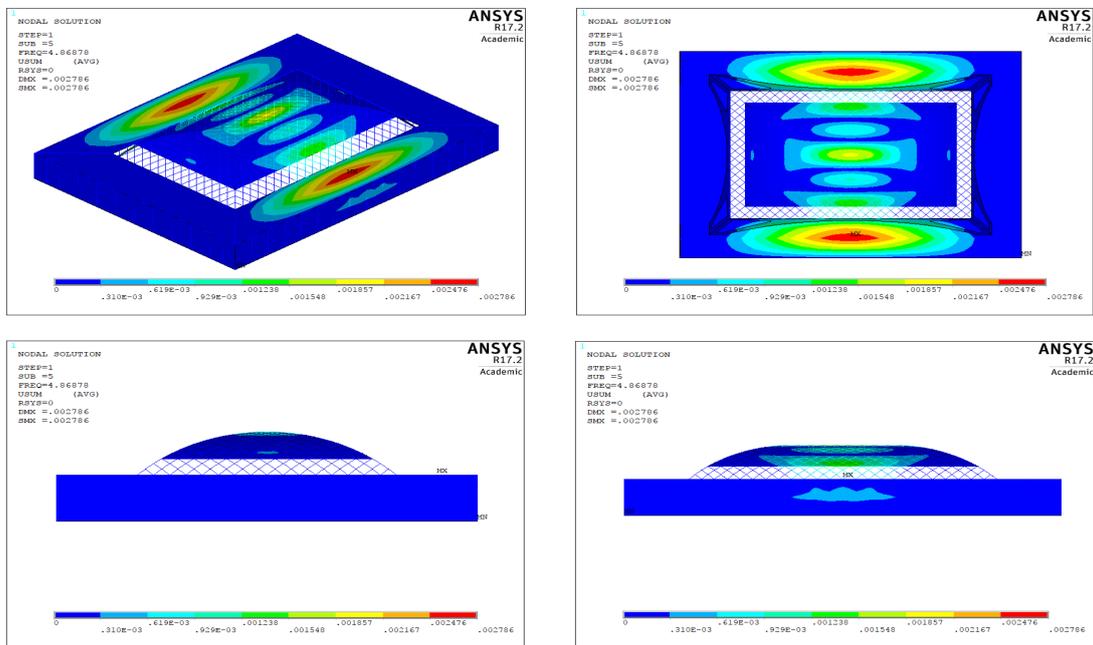


Fig. A2: Modo 5.

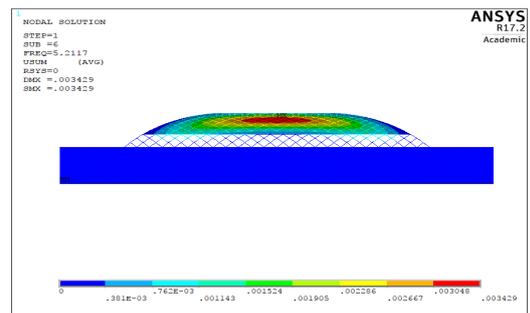
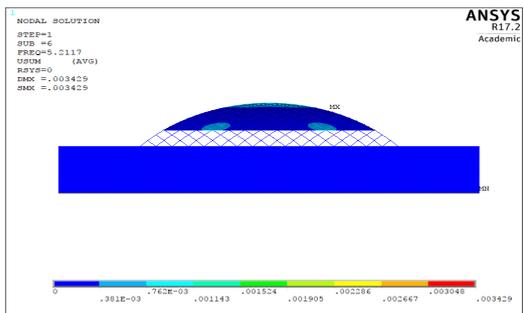
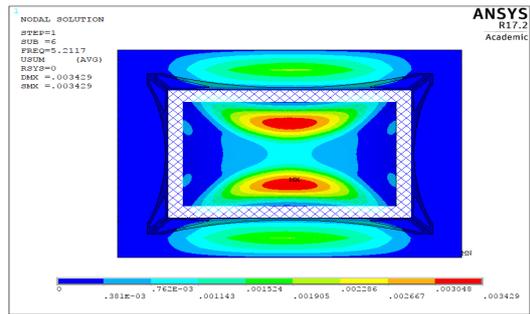
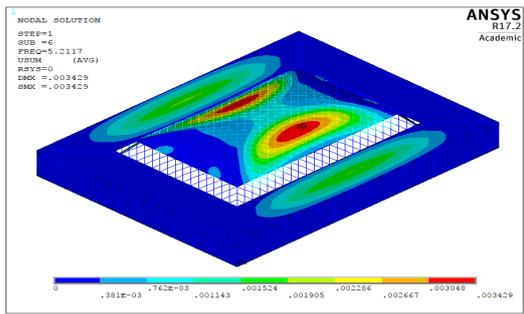


Fig. A3: Modo 6.

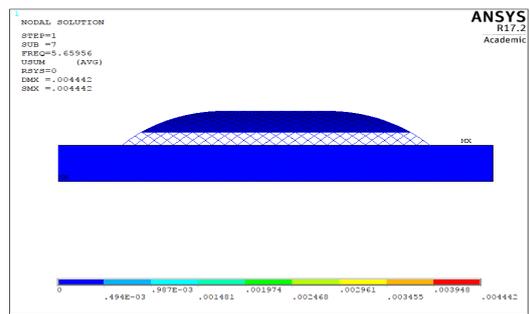
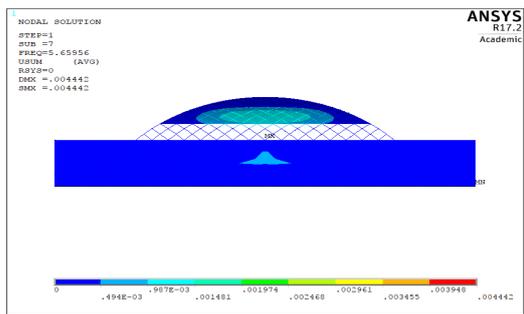
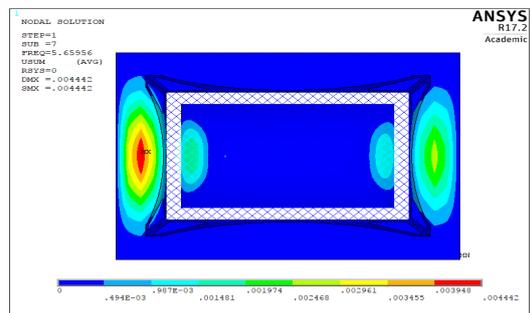
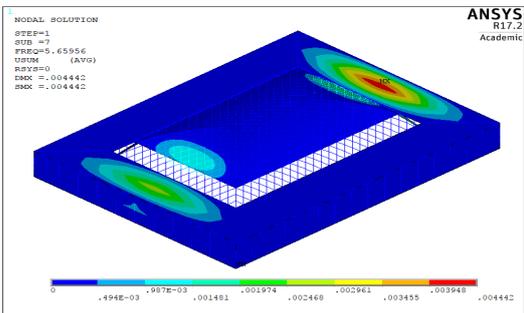


Fig. A4: Modo 7.

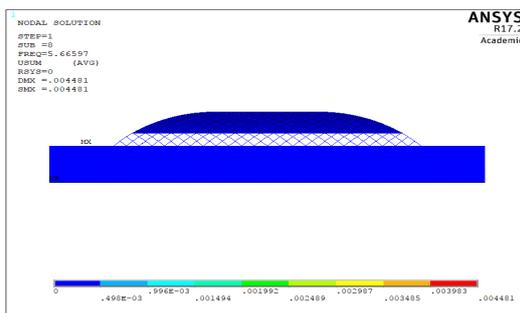
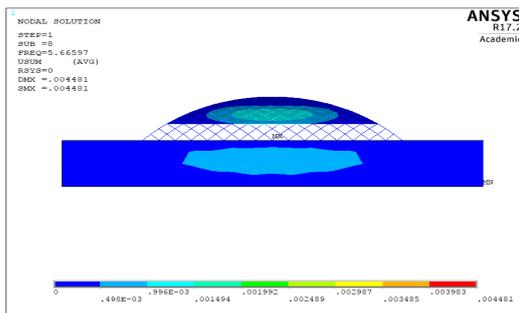
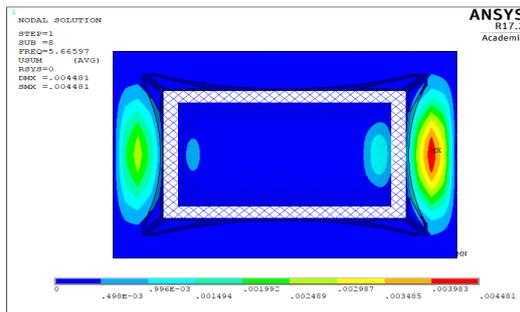
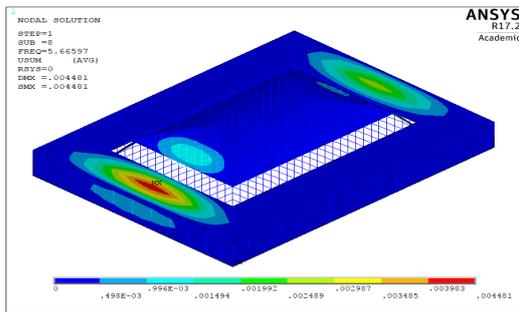


Fig. A5: Modo 8.

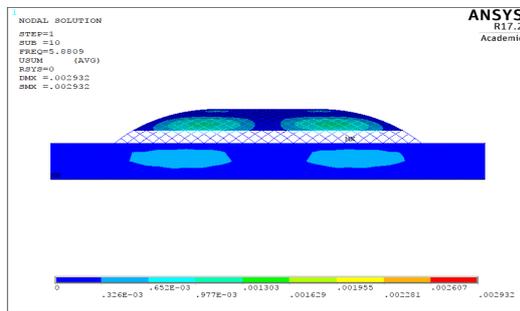
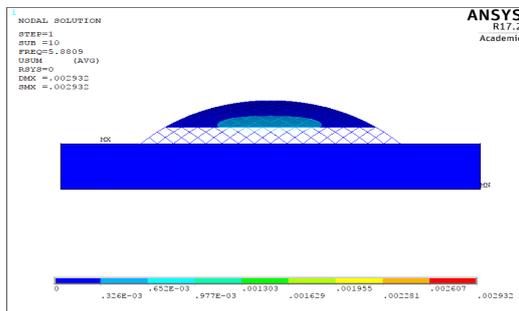
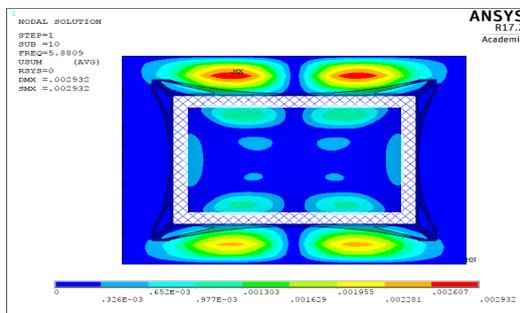
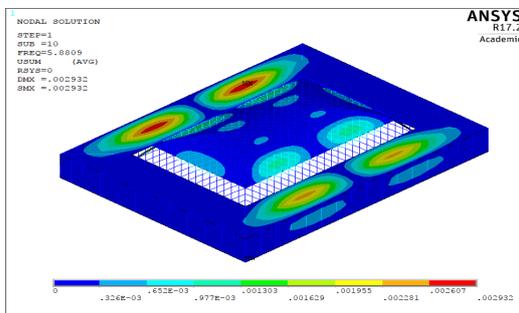


Fig. A6: Modo 10.

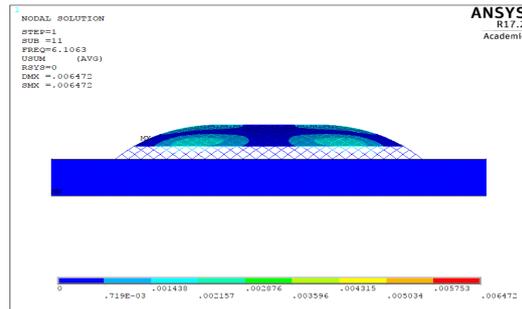
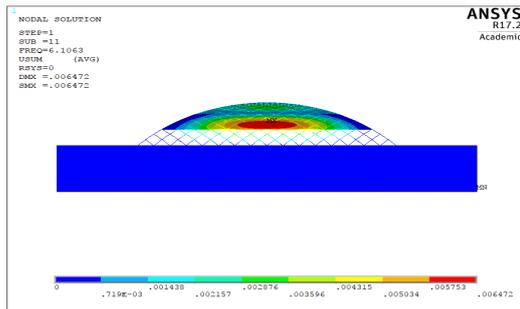
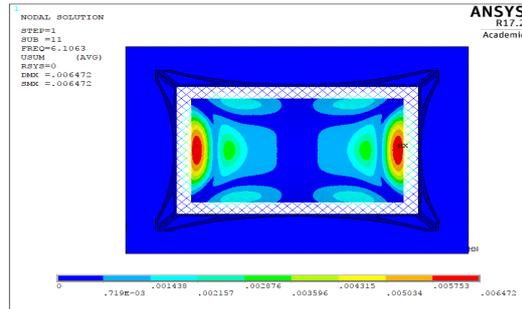
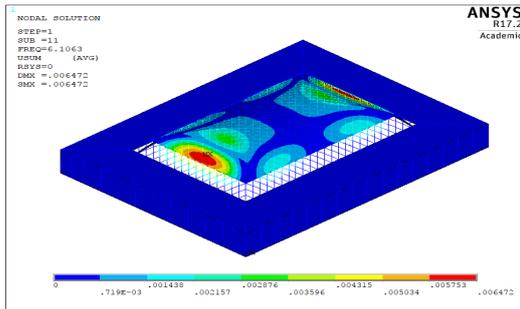


Fig. A7: Modo 11.

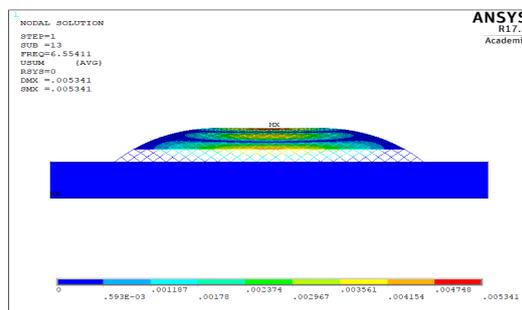
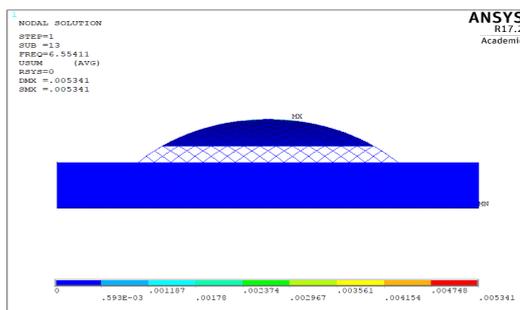
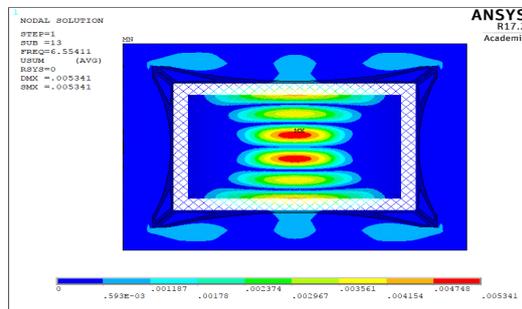
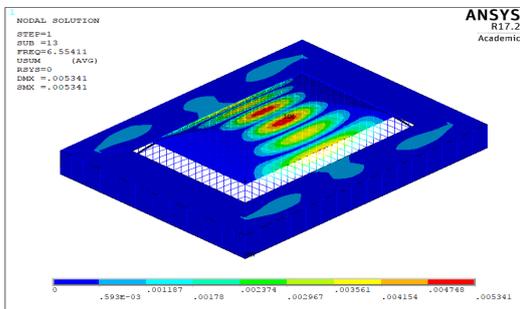


Fig. A8: Modo 13.