



COMUNE DI MONTONE

D.G.R. N. 1001 del 06/09/2016 - Interventi di prevenzione del rischio sismico su edifici pubblici strategici o rilevanti ex art. 2 co. 1 lett. b dell'OCDPC n. 293/15



VERIFICA DELLA VULNERABILITA' SISMICA E INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO SISMICO "PALAZZO COMUNALE"

PROGETTO ESECUTIVO

Elaborato		PROGETTO STRUTTURALE				
S.R6		Relazione sintetica				
		File: S.R6_e01	Layout: S.R6			
ed.	data	motivo	redatto	verificato	approvato	autorizzato
01	18/12/2019	Emissione e Consegna	LeB	LeB	LuR	PM
02						
03						
STUDIO MARCUCCI E ASSOCIATI ing. Paolo Marucci - arch. Gianluca Sforna - ing. Maurizio Spigarelli - ing. Luigi Rossi - ing. Learco Boccali via S.Apollinare 4 - 06081 ASSISI (PG) - 075/812945 - fax. 075/813757 - e-mail: posta@marucciassociati.it						
Questo documento è di proprietà esclusiva. E' proibita la riproduzione anche parziale. La proprietà tutelerà i suoi diritti in termini di legge.						

PROGETTO STRUTTURALE

**RELAZIONE SINTETICA
DEGLI ELEMENTI ESSENZIALI DEL PROGETTO STRUTTURALE**

INDICE

1	PREMESSA	2
2	TIPO DI ANALISI SVOLTA e CRITERI DI MODELLAZIONE	3
3	CODICI DI CALCOLO: ORIGINE, CARATTERISTICHE, AFFIDABILITA' E VALIDAZIONE	6
3.1	Aedes PCM	6

1 PREMESSA

Il progetto esecutivo di seguito descritto è stato redatto a seguito dell'affidamento dei *"Servizi tecnici di verifica di vulnerabilità sismica, progettazione esecutiva, direzione dei lavori, contabilità, coordinamento della sicurezza in fase di esecuzione e certificato di regolare esecuzione delle opere per lavori di miglioramento sismico su Edificio Palazzo Comunale"*. L'immobile è individuato al Catasto dei Fabbricati del Comune di Montone al Foglio n.38 con la particella n. 75 (cfr. Elab. SF.02 – Estratti Prg, Estratto Mappa Catastale, Planimetria Generale), di proprietà del Comune di Montone, ed è destinato a sede degli uffici Comunali e del Centro Operativo Comunale (COC).

I lavori sono ricompresi negli *"Interventi di prevenzione del rischio sismico su edifici pubblici strategici o rilevanti ex art 2 comma 1 lett. b dell'OCDPC n. 293/15"*, in ottemperanza a quanto previsto dal bando di cui alla DGR n.1001 del 06/09/2016.

L'edificio è stato individuato come *"Edificio strategico e rilevante"* ai sensi del DPCM n. 3685 del 21/10/2003", ed è pertanto classificato in **Classe d'Uso IV** ai sensi delle NTC18; esso, inoltre, è individuato come **Bene Monumentale** e sottoposto a tutela ai sensi della Parte II, Titolo I, Capo I del D.Lgs. n. 42/2004, art. 21.

Le opere da progettare consistono nel miglioramento sismico del Palazzo Comunale, sede degli uffici comunali e del COC, nel quale si prevede una serie di interventi strutturali sul corpo di fabbrica dell'intero edificio comprendenti:

- il rifacimento della copertura soprastante la Sala Consiliare;
- la riparazione e consolidamento delle murature lesionate a seguito degli eventi sismici del 24/08/2016 e successivi;
- il collegamento degli orizzontamenti alle murature perimetrali;
- le opere di finitura connesse alla realizzazione degli interventi strutturali comprensive anche dell'isolamento termico della copertura.

La normativa cui viene fatto riferimento nelle fasi di progettazione e calcolo è riportata nel dettaglio nella Relazione dei calcoli. In questo elaborato si evidenziano solo le norme chiave di riferimento:

- D.M del Ministero delle Infrastrutture del 17 gennaio 2018. "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", pubblicato sul supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale n° 42 del 20 febbraio 2018
- Circolare del Consiglio Superiore dei LL.PP. n° 7 del 21 gennaio 2019 "Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 17 gennaio 2018", pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale n° 35 dell' 11 febbraio 2019 – Supplemento ordinario n.5.
- DIRETTIVA DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI 9 febbraio 2011: Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008. (11A02374) (GU n. 47 del 26-2-2011 - Suppl. Ordinario n.54)

Il cap. 10 delle NTC18 fornisce le istruzioni relative alla *"Redazione dei progetti strutturali esecutivi e delle relazioni di calcolo"*, cui il progettista delle strutture deve attenersi nella redazione degli elaborati progettuali. Le indicazioni richieste dal cap. 10 delle NTC18 riguardanti la normativa utilizzata, le combinazioni di carico, il tipo di analisi condotta, i criteri di analisi e verifica e i controlli svolti sui risultati sono presentate esaustivamente nella Relazione dei calcoli e nei Tabulati allegati.

2 TIPO DI ANALISI SVOLTA e CRITERI DI MODELLAZIONE

Per l'analisi globale la struttura è stata schematizzata con un modello a telaio equivalente in cui i maschi murari, le fasce di piano, le travi, gli architravi sono rappresentati da aste che si collegano tra loro nei nodi del modello. Vengono considerate, inoltre, zone rigide in corrispondenza delle intersezioni fra i maschi e le fasce, secondo una legge di diffusione a 30°.

L'analisi statica e sismica dell'intera struttura è stata eseguita con il programma **PCM di Aedes**, con il quale è stato realizzato un modello globale che ha consentito di condurre sia le verifiche di resistenza globali dei vari elementi strutturali che di indagare meccanismi di collasso di I modo (cinematismi) che si sviluppano fuori piano.

Tale analisi è stata condotta sia nello stato attuale che tenendo conto degli interventi di progetto, per valutare il miglioramento delle condizioni di sicurezza a seguito degli interventi ipotizzati.

I modelli di stato attuale e di progetto comprendono anche le fondazioni, ipotizzate con larghezza di appoggio sul terreno pari a quella della muratura sovrastante.

Per la modellazione dell'edificio sono state assunte le seguenti ipotesi fondamentali:

- modellazione dell'edificio su quattro livelli fuori terra;
- modellazione delle reali altezze delle pareti per tenere conto del dislivello esistente tra i prospetti di monte e di valle;
- ad esclusione dei solai voltati, per i quali si è assunta l'ipotesi di orizzontamento rigido, tutti i solai allo stato attuale sono stati considerati deformabili nel proprio piano poiché, nonostante la presenza di caldane in c.a., non si ha riscontro dell'effettivo collegamento tra queste e gli elementi del solaio, e tra queste e le murature d'ambito;
- nel modello di progetto si è tenuto conto degli interventi di collegamento dei solai alle murature pertanto si è assunta l'ipotesi di livello rigido per i solai di copertura del piano ammezzato e primo;
- il solaio di copertura del piano secondo (sottotetto) non è collegato alle murature di facciata per cui nel modello si è considerato solo come carico trasmesso alle murature di spina;
- i carichi delle scale sono stati considerati modellando ogni rampa in corrispondenza di ogni piano, attraverso travi e carichi superficiali;
- si è tenuto conto dell'interazione dell'unità strutturale adiacente mediante l'applicazione sui maschi murari comuni dei carichi direttamente trasmessi o delle masse sismiche.

Il software esegue il calcolo attraverso la schematizzazione mediante "telaio equivalente" in cui i maschi murari, le fasce di piano, le travi e gli architravi sono rappresentati da aste che si collegano tra loro nei nodi del modello.

Alle strisce murarie è stata assegnata, cautelativamente una armatura in grado di simulare "l'ingranamento" degli elementi lapidei tra loro e quindi, di fatto, la resistenza a trazione delle stesse. Peraltro dai sopralluoghi condotti non sono emersi segni di lesioni di nessuna natura e consistenza sulle fasce di piano.

I carichi sono stati raggruppati in diverse condizioni elementari, organizzate in varie combinazioni, statiche e sismiche.

La valutazione della sicurezza e l'analisi della vulnerabilità sismica sono condotte secondo quanto riportato al par. 8.3 e C.8.3 delle NTC18. In particolare, il livello di sicurezza del fabbricato nei confronti dei diversi stati limite deve essere valutato in rapporto a quello richiesto per gli edifici nuovi.

Le verifiche richieste per la valutazione del livello di sicurezza della struttura esistente in classe d'uso IV sono:

- verifiche agli SLU in condizioni statiche;
- verifiche agli SLU in condizioni sismiche;
- verifiche agli SLE in condizioni sismiche;

La valutazione della vulnerabilità sismica dell'edificio è condotta secondo quanto riportato al par. 7.3.6 delle NTC18 ed in Tab. 7.3.III., in cui le verifiche globali necessarie a garantire il rispetto dei diversi stati limite, riguardano:

- verifiche di resistenza agli SLV;
- verifiche di resistenza agli SLD;
- verifiche di rigidezza agli SLO;

Sulla base di quanto riportato in precedenza, è stato implementato un modello globale della struttura mediante il quale è stata condotta **l'analisi statica e l'analisi modale** per valutare carichi verticali, periodo proprio della struttura, masse modali partecipanti e deformate nei modi di vibrare significativi.

Successivamente sono state effettuate le verifiche di resistenza degli elementi murari in fase statica:

- pressoflessione nel piano;
- taglio scorrimento;
- taglio per fessurazione diagonale;
- pressoflessione ortogonale.

Lo studio della struttura in condizioni sismiche è stato poi eseguito mediante:

- L'analisi statica non sismica: è stata effettuata per tutte le combinazioni che comprendono i soli carichi statici ed altre che includono anche il carico da neve e da vento e consente di valutare lo stato di sollecitazione dei vari elementi strutturali, nelle diverse condizioni e combinazioni di carico, adottato per le verifiche agli SLU.
- L'analisi dinamica modale lineare: è stata effettuata in combinazione sismica, mediante fattore di struttura q . I risultati ottenuti sono stati utilizzati per le verifiche di rigidezza nei confronti degli SLO.
- L'analisi statica non lineare (pushover): ha consentito di indagare la risposta della struttura considerando gli elementi murari a comportamento non lineare (elasto-plastico).

Il risultato dell'analisi è costituito dalla curva di capacità, un diagramma riportante in ascissa lo spostamento del punto di controllo e in ordinata la forza orizzontale totale applicata (taglio alla base).

Tale analisi statica non lineare è stata effettuata assegnando come distribuzioni principale e secondaria rispettivamente la prima distribuzione del Gruppo 1 (distribuzione lineare, proporzionale alle forze statiche utilizzate per l'analisi statica lineare) e la seconda del Gruppo 2 (distribuzione uniforme di forze proporzionale alle masse).

I risultati delle analisi sono stati utilizzati per valutare il livello di sicurezza allo stato attuale e ricavare gli indici di rischio sismico nei confronti delle verifiche di resistenza agli SLD ed SLV richieste dalle NTC18.

- Analisi sismica mediante studio dei cinatismi di collasso locale: le verifiche cinematiche costituiscono un riferimento fondamentale per gli edifici monumentali; per questo sono state condotte numerose verifiche dei meccanismi locali per indagare la stabilità dei pannelli rispetto alle azioni ortogonali che inducono meccanismi di ribaltamento e flessione verticale.

Tali meccanismi di I modo, sono quelli più facilmente attivabili, per un edificio esistente, in caso di evento sismico.

L'analisi di tali meccanismi ha restituito i relativi indici di sicurezza in termini di fattore di accelerazione e di tempi di ritorno allo Stato Limite Ultimo di salvaguardia della Vita (SLV) e di Danno (SLD).

COMUNE DI MONTONE

D.G.R. N. 1001 del 06/09/2016 - Interventi di prevenzione del rischio sismico su edifici pubblici strategici o rilevanti ex art. 2 co. 1 lett. b dell'OCDPC n. 293/15

Verifica di vulnerabilità sismica e Interventi di miglioramento sismico
PALAZZO COMUNALE

PROGETTO ESECUTIVO
PROGETTO STRUTTURALE
Relazione sintetica

S-R6_e01

rev_00

pagina 5 di 27

Lo studio della vulnerabilità sismica è stato pertanto condotto in maniera esaustiva e completa, indagando la struttura sia nel suo comportamento "globale" che eseguendo valutazioni "locali" sui singoli pannelli murari.

Si riporta una tabella riepilogativa delle analisi condotte e delle corrispondenti verifiche effettuate:

TIPOLOGIA DI ANALISI	TIPO DI VERIFICA	STATO LIMITE
Analisi statica non sismica	Resistenza	SLU
Analisi dinamica modale lineare	Rigidezza	SLO
Analisi statica non lineare (pushover)	Capacità Globale	SLV ed SLD
Analisi cinematica	Meccanismi locali	SLV ed SLD

Ai fini della analisi di vulnerabilità della struttura sotto le azioni sismiche, per l'individuazione di un indice di sicurezza rappresentativo delle condizioni allo stato attuale, nei confronti di ciascun stato limite, si è ritenuto significativo assumere il parametro minore tra quelli ricavati dalle analisi sismiche sopra riportate.

3 CODICI DI CALCOLO: ORIGINE, CARATTERISTICHE, AFFIDABILITA' E VALIDAZIONE

Il par. 10.2 "Analisi e verifiche svolte con l'ausilio di codici di calcolo" specifica che, qualora l'analisi strutturale e le relative verifiche siano condotte con l'ausilio di codici di calcolo automatico, il progettista dovrà controllare l'affidabilità dei codici utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti, curando nel contempo che la presentazione dei risultati stessi sia tale da garantirne la leggibilità, la corretta interpretazione e la riproducibilità. Nel presente progetto, la struttura è stata modellata con il programma Aedes PCM.

Di seguito si riportano le caratteristiche del codice di calcolo utilizzato in ottemperanza al par. 10.2 delle NTC.

3.1 Aedes PCM

Origine e caratteristiche del codice di calcolo

Titolo PCM - Progettazione di Costruzioni in Muratura
Versione 2019
Produttore AEDES Software per Ingegneria Civile, Via F. Aporti 32 - 56028 SAN MINIATO (PI)
Licenza Studio Marcucci e Associati

Campi d'impiego

Il programma Aedes PCM è un BIM strutturale, cioè un CAD 2D/3D parametrico dedicato agli edifici in muratura, ordinaria e armata, nuova ed esistente, incluse le strutture miste, con elementi in cemento armato e/o acciaio affiancati alle murature. Alla modellazione architettonica segue la schematizzazione strutturale a telaio equivalente, finalizzata all'analisi e, successivamente, all'esecuzione delle verifiche di sicurezza statiche e sismiche. Vengono generati aste e nodi con le relative proprietà, associandoli a maschi murari, fasce di piano (fasce alte e sottofinestra), pilastri, travi in elevazione e in fondazione. È possibile considerare gli impalcati rigidi, deformabili o parzialmente rigidi. Gli elementi murari possono essere consolidati con tecniche tradizionali o innovative. PCM consente tutte le analisi previste dalle normative: statica non sismica, modale, sismica statica lineare, sismica dinamica modale, statica non lineare (pushover). Le verifiche in termini di periodo di ritorno TR e di accelerazione al suolo PGA, con definizione degli Indicatori di Rischio Sismico, corredano l'analisi di vulnerabilità sismica degli edifici, inquadrando correttamente gli interventi di adeguamento e di miglioramento.

L'analisi globale viene affiancata dall'analisi cinematica (meccanismi di collasso), avente primaria importanza per gli edifici esistenti. Le verifiche cinematiche concorrono alla definizione degli Indicatori di Rischio in termini di TR e PGA.

Affidabilità dei codici di calcolo

Un attento esame preliminare della documentazione a corredo del software ha consentito di valutarne l'affidabilità. La documentazione fornita dal produttore del software contiene un'esauriente descrizione delle basi teoriche, degli algoritmi impiegati e l'individuazione dei campi d'impiego. La società produttrice Aedes ha verificato l'affidabilità e la robustezza del codice di calcolo attraverso un numero significativo di casi prova in cui i risultati dell'analisi numerica sono stati confrontati con soluzioni teoriche.

Modalità di presentazione dei risultati

La relazione di calcolo e il tabulato allegato illustrano in modo esaustivo i dati in ingresso e i risultati delle analisi in forma tabellare e/o grafica e presentano i dati in modo da garantirne la leggibilità, la corretta interpretazione e la riproducibilità.

Informazioni generali sull'elaborazione

Il software permette di effettuare una serie di controlli che consentono l'individuazione di errori di modellazione. Il codice di calcolo consente di visualizzare e controllare, sia in forma grafica che tabellare,

COMUNE DI MONTONE

D.G.R. N. 1001 del 06/09/2016 - Interventi di prevenzione del rischio sismico su edifici pubblici strategici o rilevanti ex art. 2 co. 1 lett. b dell'OCDPC n. 293/15

Verifica di vulnerabilità sismica e Interventi di miglioramento sismico
PALAZZO COMUNALE

PROGETTO ESECUTIVO
PROGETTO STRUTTURALE
Relazione sintetica

S-R6_e01

rev_00

pagina 7 di 27

i dati del modello strutturale, in modo da avere una visione consapevole del comportamento corretto del modello stesso.

Giudizio motivato di accettabilità dei risultati

I risultati delle elaborazioni sono stati sottoposti a controlli, tra cui il confronto con i risultati di semplici calcoli eseguiti con metodi tradizionali. Inoltre, sulla base di considerazioni riguardanti il comportamento globale della struttura, le caratteristiche di sollecitazione e gli stati deformativi determinati, si è valutata la validità delle scelte operate in sede di schematizzazione e modellazione della struttura e delle azioni e l'efficacia degli interventi progettati.

In base a quanto sopra, l'elaborazione è corretta ed idonea al caso specifico, pertanto i risultati del calcolo sono da ritenersi validi ed accettabili.

Di seguito si riporta un estratto della documentazione di validazione del programma.



Aedes.PCM 2017

PROGETTAZIONE DI COSTRUZIONI IN MURATURA

Analisi strutturale di costruzioni in muratura secondo la Normativa Tecnica vigente

Documento di validazione

Ultima revisione di questo documento: 27.04.2017

Tutti i diritti sono riservati, anche di riproduzione parziale, a norma di legge e delle convenzioni internazionali. Nessuna parte di questo volume può essere riprodotta in qualsiasi forma o mezzo elettronico o meccanico, per alcun uso, senza il permesso scritto della AEDES Software per Ingegneria Civile.

© 1997-2017 AEDES Software per Ingegneria Civile

Via F. Aporti 32 - 56028 SAN MINIATO (PI)

Tel.: +39 0571 401073 - Fax: +39 0571 401173

E-mail: info@aedes.it - Internet: www.aedes.it

AVVERTENZE E CONDIZIONI D'USO

La AEDES Software si riserva il diritto di apportare miglioramenti o modifiche al programma PCM, descritto nella documentazione ad esso associata, in qualsiasi momento e senza preavviso.

Il software e la documentazione allegata, anche se curati con scrupolosa attenzione, non possono comportare specifiche responsabilità di AEDES per involontari errori o inesattezze: pertanto, l'utilizzatore è tenuto a controllare l'esattezza e la completezza del materiale utilizzato. Le correzioni relative ad eventuali errori tipografici saranno incluse nelle versioni di aggiornamento.

PCM è di esclusiva proprietà della AEDES e viene concesso in uso non esclusivo secondo i termini e le condizioni riportati nel contratto di licenza d'uso. L'utente non avrà diritto ad utilizzare PCM fino a quando non avrà sottoscritto la suddetta licenza d'uso.

L'utente è responsabile della scelta di PCM al fine del raggiungimento dei risultati voluti, nonché dell'installazione, dell'uso dello stesso e dei relativi risultati.

Le sole garanzie fornite dalla AEDES in merito a PCM sono quelle riportate nella licenza d'uso. La AEDES non garantisce che le funzioni contenute in PCM soddisfino le esigenze dell'utente o funzionino in tutte le combinazioni che possono essere scelte per l'uso da parte dell'utente.

I nomi dei prodotti citati nella documentazione di PCM possono essere marchi di fabbrica o marchi registrati dalle rispettive Società.

INDICE

1. INTRODUZIONE

- 1.1. CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEL SOFTWARE Aedes.PCM
- 1.2. VALIDAZIONE DEL SOFTWARE E NORMATIVA TECNICA

2. SOLUTORE AD ELEMENTI FINITI

- 2.1. ASSEMBLAGGIO DELLE MATRICI DELLE RIGIDENZE E DELLE MASSE
- 2.2. SISTEMI LINEARI E CALCOLO AUTOVALORI

3. CASI RISOLTI E COMMENTATI: TECNICHE DI ANALISI

- 3.1. ANALISI MODALE
- 3.2. SCHEMATIZZAZIONI SHEAR-TYPE

4. CASI RISOLTI E COMMENTATI: STRUTTURE IN MURATURA

- 4.1. PARETE MURARIA MULTIPIANO CON APERTURE
- 4.2. CONFRONTO FRA METODO POR E ANALISI PUSHOVER
SECONDO NUOVE NORMATIVE SISMICHE
- 4.3. TEST SPERIMENTALE SU PROTOTIPO TRIDIMENSIONALE

5. ESAME COMPARATIVO SULL'UTILIZZO DI SOFTWARE PER LA RICOSTRUZIONE IN ABRUZZO

- 5.1. COMPORTAMENTO LOCALE
- 5.2. COMPORTAMENTO GLOBALE
 - 5.2.1. MODELLAZIONE DELLA PARETE A TELAIO EQUIVALENTE
 - 5.2.2. MODELLAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI
 - 5.2.3. MODELLAZIONE DELLE FASCE DI PIANO
 - 5.2.4. MODELLAZIONE DELL'IMPALCATO
 - 5.2.5. ANALISI E CRITICITA' DEI RISULTATI
 - 5.2.6. INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO PER IL COMPORTAMENTO SISMICO NEL PIANO
 - 5.2.7. CONCLUSIONI

1. INTRODUZIONE

In questo capitolo vengono descritte:

- le caratteristiche principali del software Aedes.PCM, dove vengono esplicitati i criteri di generazione del codice di calcolo;
- i criteri di validazione del software tecnico, in confronto con le vigenti richieste Normative.

1.1. CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEL SOFTWARE AEDES.PCM

Questo paragrafo illustra i criteri fondamentali alla base del software PCM. Ai fini della validazione nei confronti dell'utilizzo professionale è fondamentale dichiarare l'origine e le finalità del software.

Aedes.PCM è dedicato alla modellazione e all'analisi di strutture in muratura, nuove ed esistenti, con particolare attenzione al comportamento in zona sismica.

Oltre alle tipologie tradizionali, quali ad esempio i fabbricati isolati, PCM consente lo studio di edifici generici: in aggregato, monumentali, su piani sfalsati, con varia articolazione plano-altimetrica, misti in muratura e altri materiali. E' possibile schematizzare modelli 2D (soli paramenti) e 3D (modelli spaziali). Sono previste modellazioni per sottostrutture (scomposizione di fabbricati complessi) e analisi per fasi e per epoche costruttive.

E' possibile descrivere gran parte dei casi reali attraverso funzioni evolute e metodi appropriati.

Le analisi implementate sono: modale, statica lineare non sismica, sismica lineare (statica e dinamica modale), sismica statica non lineare (pushover), cinematica (meccanismi di collasso).

In analisi cinematica, lo studio realistico dei volumi interessati dai cinetismi consente la visualizzazione interattiva dei fenomeni di ribaltamento rigido, mostrando in tempo reale le verifiche di sicurezza.

L'analisi globale (elastica, lineare e non lineare) è organizzata come ambiente di tipo SAP ("Structural Analysis Program", tipico software ad elementi finiti, originariamente sviluppato a Berkeley, California, di cui esistono in Internet versioni pubbliche) applicato agli edifici in muratura (i fondamenti teorici del software sono trattati nel volume 'Teoria' della manualistica di PCM).

Le principali linee guida per la creazione e gli aggiornamenti del software PCM sono le seguenti:

- adozione di modelli di calcolo consolidati e indipendenti da uno specifico software commerciale;
- concezione del software come evoluzione delle metodologie utilizzate in passato, con le quali è possibile eseguire confronti;
- esclusione di macroelementi aventi algoritmi non resi completamente pubblici e quindi di fatto non ripetibili da terzi.

• Confronto continuo con la ricerca scientifica, in ambito indipendente

Aedes.PCM è frutto di un continuo confronto con la Ricerca Scientifica, mantenendo l'indipendenza professionale e senza utilizzare 'metodi esclusivi' non controllabili con altri codici.

Docenti Universitari esperti nel settore collaborano con Aedes a vari livelli, anche svolgendo Ricerche su incarico specifico.

In generale, i prodotti della Ricerca universitaria vengono integrati nei programmi Aedes solo ove corrispondono a metodologie rese pubbliche in modo chiaro e realmente codificabile in un software indipendente.

Riteniamo che Università, Software-house e Professionisti debbano interagire fra loro in modo trasparente e mantenendo ognuno il proprio ruolo. L'indipendenza della software-house è garanzia di un approccio critico costruttivo senza conflitti d'interesse. Ogni sforzo deve essere fatto per inquadrare correttamente le potenzialità e i limiti del campo applicativo dei metodi proposti.

Tutte le procedure di calcolo adottate nel software Aedes nascono con riferimento ad autorevoli pubblicazioni del settore; gli sviluppi originali in ambiente Aedes sono dichiarati e descritti nella documentazione associata al software. I documenti di validazione, conformi alle vigenti richieste di Normativa, contengono ogni riferimento necessario per la comprensione delle metodologie implementate.

• Metodi di analisi e verifica specifici per edifici in muratura

I metodi utilizzati sono studiati appositamente per gli edifici in muratura, e non sono derivati da ambienti pensati per cemento armato o acciaio. Lo scopo è dare alla muratura e alle tecniche costruttive storiche piena dignità, proponendo metodi di calcolo che per questo tipo di strutture non sono legati solo alla Scienza della Costruzioni, ma anche all'importantissima Statica Grafica.

L'analisi globale degli edifici in muratura è condotta con il metodo del telaio equivalente, opportunamente proposto in PCM con molte osservazioni e consigli in modo da sfruttarne pienamente le possibilità applicative.

• Modellazione della muratura con Telaio equivalente

Il metodo a telaio equivalente è a tutt'oggi consigliato nei documenti normativi di riferimento (inclusi gli EuroCodici) ed è proposto in molte Ricerche italiane e internazionali: ha il grande merito di unire semplicità a potenza di calcolo; come ogni altro schema matematico, deve essere usato con conoscenza delle sue potenzialità e dei suoi limiti, nell'ambito di un ambiente specializzato, come appunto PCM.

In PCM, ad esempio, la definizione delle zone rigide con varie modalità consente confronti e modellazioni alternative. Lo schema globale non è forzatamente di tipo shear-type: nodi ed aste possono avere vincoli esterni e interni qualsiasi, per rappresentare anche comportamenti alternativi (mensole accoppiate, singoli paramenti, ...)

Può essere inappropriato ricorrere a elementi bidimensionali con comportamento elastico o a macroelementi pur validi nella loro originaria impostazione ma di dubbia comprensibilità: appare preferibile seguire una via semplice e chiara, e contemporaneamente rivolgersi alla Ricerca per affrontare analisi con software evoluti in modo da 'tarare' adeguatamente le tecniche più semplici offerte ai Professionisti. Peraltro, si tenga presente che eccessive raffinatezze sui modelli globali a elementi finiti corrispondono spesso a precisioni illusorie, a causa dell'aleatorietà dei dati sui materiali murari.

In generale, in analisi globale piuttosto che ricercare una soluzione 'esatta' appare preferibile inquadrare correttamente l'ordine di grandezza dei risultati tenendo conto della possibile variazione dei dati.

Contemporaneamente, è molto importante riservare grande attenzione all'analisi locale per meccanismi di collasso, concettualmente semplice e molto affidabile nei risultati. Di fatto, la maggior parte delle strutture danneggiate dal sisma presenta crolli per perdita di equilibrio più che per superamento delle resistenze.

Si riporta un estratto dall'EuroCodice 8 contenente il riferimento alla modellazione a telaio di edifici in muratura sottoposti ad analisi sismica:

NORMA EUROPEA	Eurocodice 8 Progettazione delle strutture per la resistenza sismica Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici	UNI EN 1998-1
		MARZO 2005
	Eurocode 8 Design of structures for earthquake resistance Part 1: General rules, seismic actions and rules for building	Versione italiana del gennaio 2007 Corretta il 5 agosto 2010
	La norma stabilisce i requisiti fondamentali di prestazione applicabili agli edifici e alle opere di ingegneria civile in zona sismica e fornisce le regole per la rappresentazione delle azioni sismiche e per la loro combinazione con altre azioni, con l'obiettivo di assicurare che in caso di terremoto le vite umane siano protette, i danni siano limitati, e le principali strutture di protezione civile rimangano in esercizio. (...)	
9	REGOLE SPECIFICHE PER EDIFICI DI MURATURA	
9.1	Scopo e campo di applicazione	
	(1)P La presente sezione si applica alla progettazione di costruzioni di muratura non armata, confinata ed armata, in regioni sismiche. (2)P Per quanto riguarda la progettazione di edifici di muratura vale quanto contenuto nella EN 1996. Le seguenti regole vanno ad aggiungersi a quelle della EN 1996.	
UNI	UNI EN 1998-1:2005	© UNI Pagina 151
	(...)	
9.4	Analisi strutturali	
	(1)P Il modello strutturale per le analisi dell'edificio deve rappresentare le proprietà di rigidezza dell'intero sistema. (2)P La rigidezza degli elementi strutturali deve essere valutata tenendo conto sia della deformabilità flessionale che di quella tagliante e, se necessario, di quella assiale. Si può utilizzare per l'analisi la rigidezza elastica non fessurata o, preferibilmente e più realisticamente, la rigidezza fessurata al fine di tenere conto dell'influenza della fessurazione sulle deformazioni e per meglio approssimare la pendenza del primo tratto di un modello forza-deformazione bilineare per l'elemento strutturale. (3) In mancanza di un'accurata valutazione delle proprietà di rigidezza, supportata da analisi razionali, la rigidezza flessionale e a taglio fessurata possono essere considerate la metà della rigidezza elastica non fessurata della sezione lorda. (4) Nel modello strutturale i parapetti delle volte di muratura possono essere considerati come travi di collegamento tra due pareti se essi risultano essere collegati in maniera regolare alle pareti vicine e collegati sia alla trave di collegamento del solaio che all'architrave sotto.	
	(5) Se il modello strutturale tiene conto delle travi di collegamento si può utilizzare un'analisi a telaio per determinare le sollecitazioni negli elementi strutturali orizzontali e verticali.	
UNI	UNI EN 1998-1:2005	© UNI Pagina 153

• Completo controllo da parte del progettista

Nello studio degli edifici in muratura, ed in particolare nelle analisi non lineari, tutti i passi e le verifiche devono essere ripercorribili dagli Utenti: nessun metodo deve lasciare perplessità, e soprattutto le curve pushover devono corrispondere a elaborazioni comprensibili.

Nel software Aedes le procedure automatiche per la modellazione architettonica e strutturale non sostituiscono mai il completo controllo da parte del Progettista, ma svolgono un ruolo importante per aiutarlo nella definizione dei criteri standard e delle scelte più consuete. Ogni parametro è sotto controllo e può essere modificato per rappresentare correttamente il comportamento strutturale.

Normative complesse come quella in vigore, metodi ingegneristici non pienamente comprensibili e la potenza di calcolo degli attuali computer, possono interagire fra loro generando elaborazioni illusorie, e di conseguenza esponendo al rischio di minore sicurezza rispetto al passato, quando si usavano Norme, metodi e strumenti di calcolo più semplici.

L'unica via è utilizzare le nuove tecnologie mantenendole sotto controllo e ricordando l'esperienza del passato: vogliamo e dobbiamo essere Progettisti consapevoli che valorizzano la propria capacità professionale.

1.2. VALIDAZIONE DEL SOFTWARE E NORMATIVA TECNICA

Il D.M. 14.1.2008, in §10.2, prevede che il software sia corredato di un documento di validazione finalizzato a dimostrarne l'affidabilità. La norma richiede esplicitamente che siano discussi i seguenti punti:

1. Individuazione dei campi di impiego del programma
 2. Descrizione delle basi teoriche
 3. Sperimentazione del programma attraverso l'ausilio di casi di prova completamente risolti e commentati.
- I punti 1. e 2. sono ampiamente trattati nell'ambito della manualistica del software.

Relativamente alla scelta dei codici, questi sono ad elementi finiti (di tipo monodimensionale), per quanto riguarda le analisi elastiche ed elasto-plastiche. Dopo l'analisi, il software provvede all'esecuzione delle verifiche di sicurezza. Queste verifiche possono essere svolte sia in campo lineare che non-lineare (pushover). Le verifiche in campo lineare sono un'implementazione diretta delle formulazioni riportate in Normativa (D.M. 14.1.2008) per pressoflessione complanare, taglio per scorrimento, taglio per fessurazione diagonale, pressoflessione ortogonale, verifiche di spostamento. Per le procedure non-lineari, la documentazione allegata (Teoria) illustra in modo dettagliato le procedure implementate nel software. Sempre nel campo numerico, sono da considerarsi le tecniche di calcolo usate in Analisi Cinematica (ai fini dello studio dei meccanismi di collasso), che si basano sulla meccanica dei corpi rigidi ed implementano formulazioni analitiche dirette e quindi non interessate da processi di calcolo numerico con inerenti tolleranze di precisione.

La questione della validazione può essere affrontata analizzandone i diversi aspetti.

(A) Validazione del proprio progetto

Questa fase riguarda il particolare progetto esaminato: il giudizio sull'affidabilità dei risultati può essere espresso:

- I) utilizzando analisi e verifiche semplificate disponibili in PCM;
- II) controllando i parametri ritenuti significativi (sollecitazioni e deformazioni nelle aste, spostamenti dei nodi, reazioni vincolari, deformate modali), come per una qualsiasi analisi strutturale condotta con calcolo automatico.

(B) Validazione del software in generale

(B.1) Validazione dell'analisi dei carichi

I carichi generati dal software a partire dalla definizione dei campi di solaio possono essere visualizzati graficamente utilizzando le apposite opzioni di PCM; in tal modo l'Utente può accertarne la validità in modo diretto, ad esempio eseguendo confronti con semplici calcoli manuali basati sulle aree di influenza.

(B.2) Validazione del solutore ad elementi finiti

Le caratteristiche del solutore FEM sono descritte in p.2. Trattandosi di elementi finiti monodimensionali (aste), le procedure analitiche non richiedono ipotesi sui campi di spostamento; il metodo dell'equilibrio, applicato ad un insieme intelaiato di aste, noto dalla Scienza delle Costruzioni, corrisponde esattamente alla procedura risolutiva di PCM.

(B.3) Validazione delle procedure di verifica delle muratura

(B.3.1) Questa avviene attraverso il confronto:

- I) con verifiche semplici (il Por rispetto alla Pushover, o verifiche manuali) di cui sono noti i risultati (da calcoli manuali o dall'uso di algoritmi di comprovata validità);
- II) e, se disponibili, con casi risolti ufficialmente pubblicati come test di riferimento (ad es. in appendici di testi normativi).

(B.3.2) Qualora si intenda utilizzare il software per un confronto con i risultati di un test sperimentale, deve essere tenuta presente anche la questione di quanto effettivamente siano rappresentativi della realtà gli algoritmi di verifica proposte dalle Norme; ciò è evidentemente un aspetto 'a priori' indipendente dalla bontà delle procedure numeriche implementate nel software. In altri termini, l'impostazione del software può essere anche 'perfetta', ma se la tecnica di schematizzazione non è appropriata per rappresentare il comportamento reale dell'edificio oggetto di studio, i risultati potranno non essere concordi: tale aspetto tuttavia esula dalla validazione del software in sé (in altre parole, il problema si sposta nella 'validazione' degli algoritmi teorici).

2. SOLUTORE AD ELEMENTI FINITI

Riferimenti bibliografici

(principali opere consultate per la redazione del metodo ad elementi finiti implementato in PCM)

[2.1] J. S. Przemieniecki: "Theory of Matrix Structural Analysis", Dover Publications Inc., New York, 1985

[2.2] J. A. D. Balfour: "Analisi di strutture col calcolatore", Hoepli, Milano, 1990

[2.3] PC-SAP4: "A structural analysis program for static and dynamic response of linear systems", by Bruce F. Maison, 1994, based on SAP4 developed by K.J.Bathe, E.L.Wilson, F.E.Peterson, University of California, Berkeley, IBM mainframe version by University of Southern California, 1974

[2.4] F. Cappello, G.M. Cocchi, G. Menditto: "Metodi matematici nell'ingegneria strutturale", ESAC, Roma, 1990

Il solutore numerico di PCM si compone di due parti.

La prima parte, sviluppata da Aedes e integrata in PCM, provvede alla creazione della matrice di rigidezza del sistema (p.2.1). E' così possibile tenere conto di aspetti tipici degli edifici in muratura spesso non gestiti da solutori destinati ad altro utilizzo (ad esempio: deformabilità a taglio, indispensabile per strutture 'tozze' quali i maschi murari; rigidezze fessurate (percentuali delle rigidezze elastiche); zone rigide agli estremi dell'asta distinte nei due piani di flessione; gradi d'incastro interno, per schematizzare aste semi-incastrate; aste infinitamente rigide; assemblaggi di rigidezze per pareti geometricamente 'spezzate' per le quali si voglia comunque considerare la continuità strutturale). Nella costruzione delle matrici di rigidezza, PCM segue algoritmi ampiamente testati, analoghi alle procedure SAP (Berkeley, California) reperibili anche in open-source su Internet.

La seconda parte (p.2.2) è costituita dal solutore numerico vero e proprio, ed è dedicata alla risoluzione dei sistemi lineari e dei problemi agli autovalori legati alle analisi modali. Al fine di garantire la massima robustezza di calcolo, e rispettare i requisiti di qualità richiesti al software, Aedes integra componenti matematici sviluppati da software-houses con comprovata validità a livello internazionale, di ampio spettro applicativo e con estesa e dettagliata documentazione di validazione (rivolgersi a: info@aedes.it per ulteriori informazioni).

2.1. ASSEMBLAGGIO DELLE MATRICI DELLE RIGIDezZE E DELLE MASSE

Si descrive la costruzione della **matrice di rigidezza K** della struttura, definendo anzitutto la matrice di rigidezza locale di una singola asta.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	$\frac{EA}{\ell}$	0	0	0	0	0	$-\frac{EA}{\ell}$	0	0	0	0	0
2		$\frac{12 EJ_z}{\ell^3 (1+\Phi_y)}$	0	0	0	$\frac{6 EJ_z}{\ell^2 (1+\Phi_y)}$	0	$-\frac{12 EJ_z}{\ell^3 (1+\Phi_y)}$	0	0	0	$\frac{6 EJ_z}{\ell^2 (1+\Phi_y)}$
3			$\frac{12 EJ_y}{\ell^3 (1+\Phi_z)}$	0	$-\frac{6 EJ_y}{\ell^2 (1+\Phi_z)}$	0	0	0	$-\frac{12 EJ_y}{\ell^3 (1+\Phi_z)}$	0	$-\frac{6 EJ_y}{\ell^2 (1+\Phi_z)}$	0
4				$\frac{GJ_x}{\ell}$	0	0	0	0	0	$-\frac{GJ_x}{\ell}$	0	0
5					$\frac{(4+\Phi_z) EJ_y}{\ell (1+\Phi_z)}$	0	0	0	$\frac{6 EJ_y}{\ell^2 (1+\Phi_z)}$	0	$\frac{(2-\Phi_z) EJ_y}{\ell (1+\Phi_z)}$	0
6						$\frac{(4+\Phi_y) EJ_z}{\ell (1+\Phi_y)}$	0	$-\frac{6 EJ_z}{\ell^2 (1+\Phi_y)}$	0	0	0	$\frac{(2-\Phi_y) EJ_z}{\ell (1+\Phi_y)}$
7							$\frac{EA}{\ell}$	0	0	0	0	0
8								$\frac{12 EJ_z}{\ell^3 (1+\Phi_y)}$	0	0	0	$-\frac{6 EJ_z}{\ell^2 (1+\Phi_y)}$
9									$\frac{12 EJ_y}{\ell^3 (1+\Phi_z)}$	0	$\frac{6 EJ_y}{\ell^2 (1+\Phi_z)}$	0
10										$\frac{GJ_x}{\ell}$	0	0
11											$\frac{(4+\Phi_z) EJ_y}{\ell (1+\Phi_z)}$	0
12												$\frac{(4+\Phi_y) EJ_z}{\ell (1+\Phi_y)}$

Fig. 2.1.1. Matrice di rigidezza **k** dell'elemento 'beam' (asta spaziale);
la lunghezza ℓ corrisponde alla luce deformabile

In fig. 2.1.1 è illustrata la matrice di rigidezza **k** dell'asta spaziale 3D di tipo 'beam', cioè un elemento monodimensionale con rigidezza flessionale e torsionale. La matrice di rigidezza **k** è simmetrica: $k_{ij} = k_{ji}$, $i, j=1, \dots, 12$.

Nelle espressioni dei coefficienti della matrice, sono utilizzati i termini Φ_y e Φ_z che tengono conto della deformabilità a taglio:

$$\Phi_y = (12 E J_z) / (G A_{Ty} \ell^2)$$

$$\Phi_z = (12 E J_y) / (G A_{Tz} \ell^2)$$

I coefficienti Φ_y e Φ_z sono nulli se si prescinde dalla deformabilità a taglio (questa opzione è inclusa nei Parametri di Calcolo, scheda Generali). Per gli edifici in muratura ed in generale per tutti gli elementi di tipo 'parete' ha fondamentale importanza considerare l'influenza della deformabilità a taglio.

L'elemento 'beam' è collegato agli altri elementi della struttura tramite vincoli di continuità (incastri interni) e costituisce il classico elemento 'trave' delle strutture intelaiate. Le caratteristiche di sollecitazione sono riferite ad una terna destrorsa (assi locali) con l'asse x coincidente con l'asse geometrico (baricentrico) dell'elemento e gli assi y e z coincidenti con gli assi principali d'inerzia della sezione trasversale.

La matrice di rigidezza illustrata in fig. 2.1.1 si riferisce al **tratto deformabile dell'asta**, cioè la luce interna dell'asta depurata dalle zone rigide di estremità. Si noti che per gli schemi a 'telaio equivalente' ha fondamentale importanza considerare aste a comportamento misto rigido-deformabile.

Le aste in muratura, come noto, possono essere caratterizzate da **zone rigide** distinte nei due piani di flessione: un maschio murario, ad esempio, trova l'irrigidimento in sommità a causa della fascia di piano: questo irrigidimento interessa il piano complanare della parete; ma lo stesso maschio non presenta normalmente irrigidimenti significativi nel piano ortogonale.

In generale, si dovranno considerare lunghezze di deformazione diverse nei due piani di flessione.

I coefficienti della matrice di rigidezza devono quindi essere corretti in base a tale aspetto.

Più in dettaglio, ciò significa:

- sostituire ℓ con ℓ_{xz} (lunghezza di deformazione nel piano locale xz) nei termini flessionali contenenti EJ_y ;
- sostituire ℓ con ℓ_{xy} (lunghezza di deformazione nel piano locale xy) nei termini flessionali contenenti EJ_z ;
- per i termini assiale e torsionale è possibile fare riferimento ad una lunghezza deformabile media fra le due diverse lunghezze deformabili nei due piani di flessione: ℓ viene sostituito da $(\ell_{xy} + \ell_{xz})/2$ nei termini in EA e GJ_x .

Per un'asta **infinitamente rigida**, i moduli di elasticità E e G vengono adeguatamente amplificati.

I coefficienti della matrice di rigidezza subiscono ulteriori modifiche qualora l'asta sia affetta da una **riduzione della rigidezza elastica (rigidezza fessurata)**, o rigidezza secante per pareti che hanno superato il limite elastico ma non sono ancora collassate nel corso delle analisi non lineari; queste rigidezze sono inferiori alla rigidezza iniziale di tipo elastico. PCM consente l'applicazione di rigidezze ridotte anche ad analisi statiche lineari non sismiche).

Per aste aventi tipologie di pareti (inclusi i maschi murari), fasce (strisce e sottofinestra) e travi, i fattori riduttivi delle rigidezze vengono applicati ai termini flessionale EJ e tagliante GA complanari. La fessurazione dell'elemento può essere infatti riferita essenzialmente al comportamento nel piano dell'elemento (comportamento elasto-plastico delle pareti murarie).

Per tutti gli altri elementi verticali (es.: pilastri in acciaio) le rigidezze fessurate vengono applicate in tutte le direzioni, in quanto in tali casi non è possibile distinguere un piano 'complanare' e uno 'ortogonale'.

Per le bielle di controvento, che possono superare il limite elastico durante l'analisi non lineare, la riduzione viene applicata al termine assiale.

Infine, nessuna riduzione di rigidezza è prevista per elementi aventi le seguenti tipologie: fondazioni, collegamenti rigidi, conci murari, giunti di conci murari e pilastri in muratura.

La riduzione della rigidezza nella costruzione della matrice dipende dalle opzioni specificate in input, e può riguardare indipendentemente le analisi lineari e l'analisi non lineare.

Un altro aspetto che determina modifiche sui coefficienti della matrice di rigidezza è determinato dai **Gradi d'incastro** specificati nei dati Aste. E' infatti possibile definire un semincastro interno al vertice iniziale e/o al vertice finale, nel piano xy e/o nel piano xz, sempre con riferimento alla luce deformabile del piano del semincastro. Il semincastro equivale alla rigidezza di una molla di torsione posta nell'estremo. Al di là delle specifiche fornite in input nei dati Aste, nell'esecuzione delle successive sotto-curve in Analisi Non Lineare, presentano semincastri tutte le aste che hanno manifestato la formazione di una cerniera plastica (alla base o in sommità) per pressoflessione, ma non sono collassate al termine della sotto-curva precedente (la curva è terminata per il collasso di altri elementi), e quindi devono ripartire, all'inizio della sotto-curva successiva, con una configurazione degradata, rappresentata appunto dal vertice ancora internamente incastrato ma con rigidezza ridotta.

Nella costruzione della matrice di rigidezza, particolari relazioni devono inoltre essere applicate alle travi su suolo elastico alla Winkler.

Nel caso di aste non internamente incastrate ma caratterizzate da **svincolamenti interni**, cioè da una o più componenti di spostamento libere agli estremi (un esempio è la 'biella', elemento incernierato agli estremi), la matrice \mathbf{k} viene ridotta alle sole componenti vincolate, tramite metodi di condensazione statica.

Successivamente, interviene una **trasformazione** per tenere conto delle **zone rigide** di estremità, riconducendo la matrice - inizialmente costruita sulla luce deformabile - all'asta completa. La matrice di trasformazione \mathbf{t} è costruita a partire dalla matrice identità \mathbf{I} :

$t_{ij} = 1$ per $i=j$, $t_{ij} = 0$ per $i \neq j$

con le seguenti modifiche:

$$t(5,3) = -ZR_{ixz}$$

$$t(6,2) = ZR_{ixy}$$

$$t(11,9) = ZR_{jxz}$$

$$t(12,8) = -ZR_{jxy}$$

dove i termini ZR_{ixz} ZR_{ixy} ZR_{jxz} ZR_{jxy} coincidono con le zone rigide definite nei dati Aste per il tratto iniziale (i) e il tratto finale (j) nei due piani di flessione xy e xz. La relazione di trasformazione è la seguente:

$$\mathbf{k}' = \mathbf{t} \mathbf{k} \mathbf{t}^t$$

\mathbf{k}' è la matrice di rigidezza locale ricondotta all'asta a comportamento misto rigido-deformabile.

La matrice di rigidezza viene infine ricondotta dal riferimento locale al globale tramite la matrice di rotazione λ :

$$\mathbf{k}_{glob} = \lambda^t \mathbf{k}' \lambda$$

La matrice di rigidezza dell'asta nel riferimento globale deve subire inoltre un'altra **trasformazione** di rigidità nel caso che i nodi di vertice dell'asta abbiano componenti di spostamento rigidamente vincolate al nodo master (schematizzazione **master-slave**).

A questo punto avviene l'**assemblaggio** delle singole matrici di rigidezza delle aste **nella matrice di rigidezza K della struttura**.

La **matrice delle masse M**, utilizzata per l'analisi modale, viene costruita con le masse nodali ed è pertanto una matrice diagonale. Ai gradi di libertà dinamici corrispondono generalmente masse traslazionali m_X m_Y e inerzie torsionali I_Z .

Le masse considerate sono quelle appartenenti a CCE sismicamente attive, riconosciute da un coefficiente ψ_2 non nullo.

Anzitutto, vengono processate le masse concentrate inserite direttamente nei nodi; in caso di relazione master-slave, le eventuali masse specificate su nodi slave vengono normalmente ricondotte al nodo master, rispetto al quale generano anche inerzia torsionale.

Successivamente, sono esaminati i carichi concentrati sui nodi ed i carichi concentrati e distribuiti sulle aste (esclusi eventuali carichi applicati su aste su suolo elastico), agenti in direzione Z globale (carichi gravitazionali): tali carichi vengono automaticamente trasformati in masse nodali (riconducendo i pesi a masse tramite la divisione per l'accelerazione di gravità).

Inerzie rotazionali I_X e I_Y non nulle sono inconsuete, e non vengono gestite nella generazione automatica. Eventuali inerzie I_X e I_Y che si vogliano considerare nella struttura, devono essere definite direttamente come masse nodali concentrate. Nel caso di schematizzazione master-slave, l'inerzia rotazionale I_Z viene invece normalmente definita, insieme alle masse traslazionali m_X e m_Y (ed eventualmente m_Z). Per un dato carico agente su un'asta, I_Z è formata dall'inerzia rotazionale del carico più il momento di trasporto verso il nodo di concentrazione della massa.

La definizione delle masse tiene conto dei moltiplicatori per la generazione delle masse: se ad esempio il moltiplicatore traslazionale Y è nullo, vengono generate solo masse traslazionali secondo X.

Durante il calcolo, viene determinata anche la posizione del baricentro (centro delle masse) per ogni piano. In caso di piano rigido, se il nodo master non coincide con un nodo della struttura (cioè non è collegato ad alcuna asta), la sua posizione viene automaticamente ricalibrata facendola coincidere con il baricentro.

2.2. SISTEMI LINEARI E CALCOLO AUTOVALORI

Il solutore agli elementi finiti adottato da PCM utilizza la tecnologia delle matrici sparse.

In breve, ciò significa una maggior efficacia di trattazione di problemi anche di grandi dimensioni, attraverso un'opportuna gestione delle parti numeriche delle matrici effettivamente non nulle, con risparmio di memoria RAM occupata e riduzione dei tempi di elaborazione.

La riduzione dei tempi di calcolo, già rilevante nelle analisi lineari, è particolarmente importante per l'analisi pushover, caratterizzata dalla riesecuzione di molteplici analisi lineari, nel corso dei vari passi incrementali. L'analisi pushover può così essere condotta con tempi ottimizzati anche per problemi di ordine rilevante (per numero di elementi strutturali o per gradi di libertà statici e/o dinamici).

Per il calcolo di autovalori e autovettori, si applica il metodo di Lanczos, una tecnica di risoluzione di grande efficacia nel caso di strutture complesse. E' quindi particolarmente indicato in edifici con impalcati flessibili, dove ogni massa nodale viene considerata vibrante nella sua posizione, con conseguente elevato numero di gradi di libertà dinamici.

N.B. Gli **edifici in muratura con impalcati flessibili** possono essere adeguatamente studiati con PCM attraverso la modellazione tridimensionale e la successiva risoluzione dello schema statico complessivo, caratterizzato da molti gradi di libertà dinamici (le due traslazioni per ogni massa nodale): il solutore adottato da PCM consente appunto un'agevole trattazione di questi casi.

Il Progettista prenderà comunque in considerazione anche l'opportunità di schematizzazioni alternative, ove possibili: se ad esempio in un edificio esistente gli impalcati sono tutti flessibili (non esiste alcun piano rigido), PCM consente anche l'analisi dei singoli paramenti murari 2D (ottenibili per sottomodelli anche da un unico modello 3D), che può sostituire il calcolo di un unico modello 3D, con ridimensionamento dell'onere computazionale (anche se i modelli da processare non sono più uno soltanto ma diventano pari al numero dei paramenti costituenti l'edificio). ■

3. CASI RISOLTI E COMMENTATI: TECNICHE DI ANALISI

L'analisi statica e sismica degli edifici, di qualsiasi tipologia strutturale, si articola in due fasi: analisi numerica del modello matematico, e conseguente svolgimento delle verifiche di sicurezza.

Come illustrato nei paragrafi precedenti, l'analisi numerica di PCM riguarda la tecnica ad elementi finiti per aste (elementi monodimensionali); la prima parte dell'analisi, consistente nella costruzione delle matrici di rigidità e di massa è svolta dal codice originale di PCM, mentre la seconda parte, dedicata alla soluzione del problema matematico (sistema lineare e/o analisi modale), è svolta dal solutore (cfr. p.2.2).

La validazione di PCM dal punto di vista dell'analisi strutturale può essere condotta con qualsiasi esempio di un insieme di aste sottoposto a carichi statici e/o sismici, di cui siano noti i risultati p.es. da formulazioni analitiche o dall'utilizzo di altre procedure di comprovata validità. Fra gli innumerevoli casi che possono essere assunti come riferimento, in questo Manuale si riportano due test riguardanti l'Analisi Modale (p.3.1) e la soluzione statica di uno schema shear-type (p.3.2).

Come è evidente, PCM può essere utilizzato per l'analisi di qualsiasi sistema intelaiato (composto cioè da aste), comunque caricato e vincolato, e di qualsiasi materiale (e quindi non solo muratura). I test per strutture generiche su PCM ne convalidano l'implementazione degli algoritmi. In seguito, nei paragrafi p.4.1, 4.2, 4.3 studi dettagliati vengono dedicati alla verifica strutturale degli edifici in muratura, costituenti il principale campo applicativo del software PCM.

3.1. ANALISI MODALE

Riferimenti bibliografici

[3.1.1] SAP2000®, Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, VERIFICATION MANUAL, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, Version 6.1, Revised July 1997

[3.1.2] ETABS®, Integrated Software for Structural Analysis and Design, SOFTWARE VERIFICATION EXAMPLES, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, Version 8, June 2003

Files dati di riferimento, installati dal software:

confronto con SAP 2000: Pcm\Esempi_Validazione\Eigenvalue_Bathe_and_Wilson.vdml

confronto con ETABS: Pcm\Esempi_Validazione\Eigenvalue_Bathe_and_Wilson_ETABS.vdml

Dalla documentazione di validazione dei software SAP 2000 ed ETABS © Computer and Structures, Berkeley, California, si trae un test di validazione per il calcolo degli autovalori. In SAP 2000 le masse sono considerate attive in direzione orizzontale e verticale; in ETABS solo in direzione orizzontale. Ciò permette un confronto dettagliato con PCM, dove sono possibili entrambe le schematizzazioni.

Estratto da [3.1.1]

Example 2

Bathe and Wilson Frame — Eigenvalue Problem

Description

This is a ten-bay, nine-story, two-dimensional frame structure solved in Reference [1]. The framing and the material and section properties are shown in Figure 2-1. The mass per unit length and other properties used are consistent with References [1] and [2], to which the results are compared. The first three eigenvalues are computed.

Significant Options of SAP2000 Activated

- Two-dimensional frame analysis
- Eigenvalue analysis

Input Data

The computer model used is shown in Figure 2-1. Kip-foot units are used. Mass per unit length of the members is specified. The program automatically computes the joint masses to be used in the eigenvalue analysis.

The input data file for this example is FRAMEBW.

13

SAP2000 Verification Manual

Comparison of Results

A comparison of the first three eigenvalues computed by SAP2000 with results from References [1] and [2] is presented in Figure 2-2. The comparison is excellent.

References

1. Bathe, K. J. and Wilson, E. L.
Large Eigenvalue Problems in Dynamic Analysis, Journal of the Eng. Mech. Div., ASCE, Vol. 98, No. EM6, Proc. Paper 9433, Dec. 1972.
2. Peterson, F. E.
EASE2, Elastic Analysis for Structural Engineering, Example Problem Manual, Engineering Analysis Corporation, Berkeley, California, 1981.

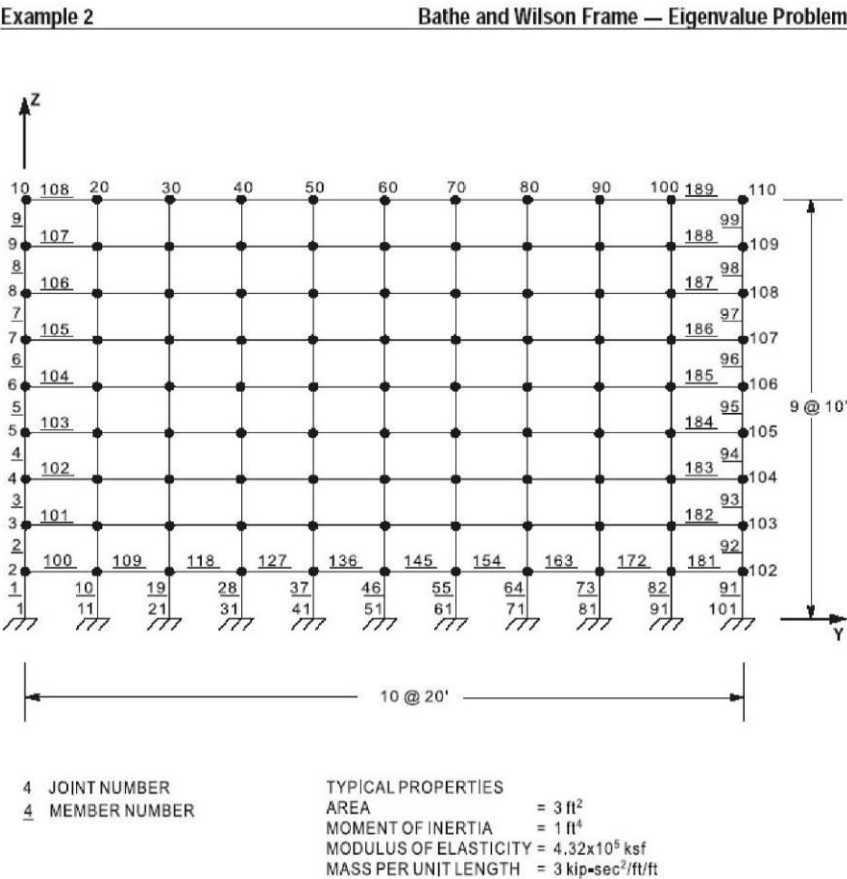


Figure 2-1
Bathe and Wilson Frame Example

SAP2000 Verification Manual

Mode	SAP2000	Reference [1]	Reference [2]
1	0.589541	0.589541	0.589541
2	5.52696	5.52695	5.52696

Figure 2-2
Comparison of Eigenvalues

Estratto da [3.1.2]



Nine-Story, Ten-Bay Plane Frame Eigenvalue Analysis

Description

This is a nine-story, ten-bay plane frame, as shown in Figure 6-1.

An eigenvalue analysis is made.

Significant Options of ETABS Activated

- ☐ Two-dimensional frame analysis
- ☐ Eigenvalue analysis

Computer Model

The frame is modeled with eleven column lines and ten bays. Kip-ft-second units are used.

Description

6 - 1

Example 6

ETABS Verification Manual

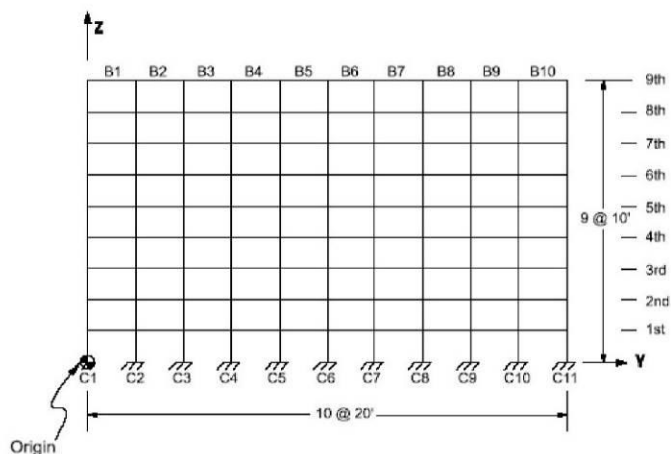


Figure 6-1 Nine-Story, Ten-Bay Plane Frame

A modulus of elasticity of 432000 ksf is used. A typical member axial area of 3ft^2 and moment of inertia of 1ft^4 are used. A mass of $3\text{kip}\cdot\text{sec}^2/\text{ft}$ of member length is converted to story mass using tributary lengths and used for the analysis.

The input data filename for this example is EX6.EDB. This file is available on the CD.

Comparison of Results

This example is also analyzed in Wilson and Habibullah (1992) and Bathe and Wilson (1972). There are two differences between the ETABS analysis and the analyses of the references. The models of the references assign vertical and horizontal mass degrees of freedom to each joint in the structure. However, the ETABS model only assigns horizontal masses and additionally, only one horizontal mass is assigned for all the joints associated with any one floor level.

6 - 2 Comparison of Results

ETABS Verification Manual

Example 6

The eigenvalues obtained from ETABS are compared in Table 6-1 with results from Wilson and Habibullah (1992) and Bathe and Wilson (1972). Considering the differences in modeling enumerated herein, the comparison is excellent.

Table 6-1 Comparison of Results for Eigenvalues

Quantity	ETABS	Wilson and Habibullah	Bathe and Wilson
1	0.58964	0.58954	0.58954
2	5.53195	5.52696	5.52695
3	16.5962	16.5879	16.5878

References

- Bathe, K.J. and E.L. Wilson 1972. Large Eigenvalue Problems in Dynamic Analysis. Journal of the Eng. Mech. Div. ASCE. Vol. 98, No. EM6, Proc. Paper 9433. December.
- Wilson, E.L. and A. Habibullah 1992. *SAP90, Sample Example and Verification Manual*, Computers and Structures, Inc. Berkeley, California.

Nelle pagine precedenti sono stati riportati estratti dalla documentazione di SAP 2000 ed ETABS, © Computer and Structures, Berkeley, che verranno qui di seguito confrontati con gli output di PCM. Prima di esaminare il modello, riportiamo le conversioni di unità di misura dal sistema inglese al sistema internazionale e al sistema tecnico:

LUNGHEZZA: 1 ft = 12 in = 30.48 cm = 0.3048 m

1 in = 2.54 cm

AREA: 1 sq in = 6.4516 cm²

1 sq ft = 929.03 cm²

FORZA: 1 p (pound) (lb) = 0.4536 kgf = 4.448222 N

1 kip (kilopound) = 453.6 kgf = 4448.222 N

PRESSIONE: 1 ksi (kilopound/square inches) = 70.308 kgf/cm² = 6.894758 N/mm² (MPa)

1 psi (pound / square inches) = 0.070308 kgf/cm² = 0.006894758 N/mm² = 6894.758 N/m²

1 ksf (kilopound / square feet) = 0.4882428 kgf/cm² = 0.04788 N/mm² = 47780 N/m²

CARICO

DISTRIBUITO: 1 kip / ft = 14.882 kgf/cm = 1488.2 kgf/m = 14.594 kN/m

Per i parametri utilizzati nell'esempio, si ha:

Proprietà degli elementi strutturali:

Area e momento d'inerzia della sezione trasversale:

$A = 3 \text{ ft}^2 = 2787.09 \text{ cm}^2$

$J = 1 \text{ ft}^4 = 863097.48 \text{ cm}^4$

In PCM è stata definita la sezione rettangolare che meglio approssima tali valori, avente dimensioni 457 x 610 mm.

Modulo di elasticità:

$E = 4.32 \times 10^5 \text{ ksf} = 20684 \text{ N/mm}^2$

Per il modulo di elasticità tangenziale, si potrebbe adottare un valore tipo: $G = 0.4 E$, ma poiché negli esempi considerati si prescinde dalla deformabilità a taglio, per simulare questa impostazione in PCM si definisce un valore di G molto elevato, pari a: $0.4 E \cdot 10^5$.

Massa per unità di lunghezza:

$\mu = 3 \text{ (kip s}^2\text{/ft)/ft} = 143.640 \text{ (kN s}^2\text{/m)/m} = 143.640 \text{ Mg/m}$ (Mg = megagrammo massa)

La dimensione di base del telaio è 10 campate di 20' = 20 ft = 6.096 m ciascuna; la dimensione in altezza è di 9 elevazioni di 10' ciascuna = 10 ft = 3.048 m

Le masse nodali vengono calcolate nel seguente modo (l'unità di massa concentrata è sono: $Mg = k \cdot kgm$):

- i due nodi estremi laterali di sommità: $143.640 \cdot (3.048/2 + 6.096/2) = 656.72$
- tutti gli altri nodi laterali: $143.640 \cdot (3.048 + 6.096/2) = 875.63$
- nodi interni di sommità: $143.640 \cdot (3.048/2 + 6.096) = 1094.53$
- tutti gli altri nodi interni: $143.640 \cdot (3.048 + 6.096) = 1313.44$

I vincoli esterni dei nodi sono i seguenti: incastri alla base, e gradi di libertà attivi per lo spostamento orizzontale e verticale e per la rotazione nel piano della struttura (intorno all'asse Y normale al piano del telaio) per tutti i nodi in elevazione; in tal modo viene considerato il comportamento piano (2D).

Tutte le aste hanno vincolamento interno incastro-incastro.

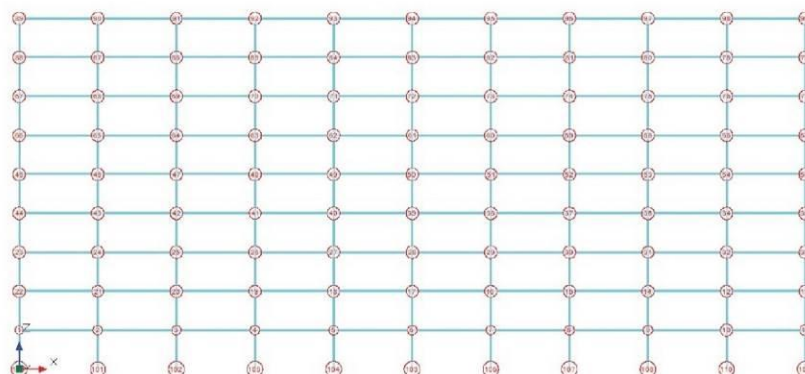


Fig. 3.1.1. Numerazione dei nodi

L'analisi con PCM viene condotta con due modelli, uno per il confronto con SAP, dove le masse traslazionali sono attive sia in direzione orizzontale (X) che in direzione verticale (Z); l'altro, per il confronto con ETABS, considerando masse traslazionali solo in direzione orizzontale. Per questa impostazione, vengono definiti gli opportuni moltiplicatori delle masse nella Condizione di carico elementare di riferimento (Permanente), alla quale vengono attribuite tutte le masse nodali.

Confronto con SAP (si considerano i risultati dei soli primi 3 modi, che interessano ai fini del test):

Modo	Autovalore (rad/sec) ²	Frequenza (cicli/sec)	Periodo (sec)	Masse modali efficaci (% sulla massa totale)			Totale progressivo %			Quote masse modali efficaci (m)		
				X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0.590	0.122	8.177	81.778	0.000	0.000	81.778	0.000	0.000	18.586	0.000	17.283
2	5.535	0.374	2.671	9.697	0.000	0.000	91.475	0.000	0.000	15.240	0.000	18.560
3	16.613	0.649	1.542	3.674	0.000	0.000	95.149	0.000	0.000	15.040	0.000	19.493

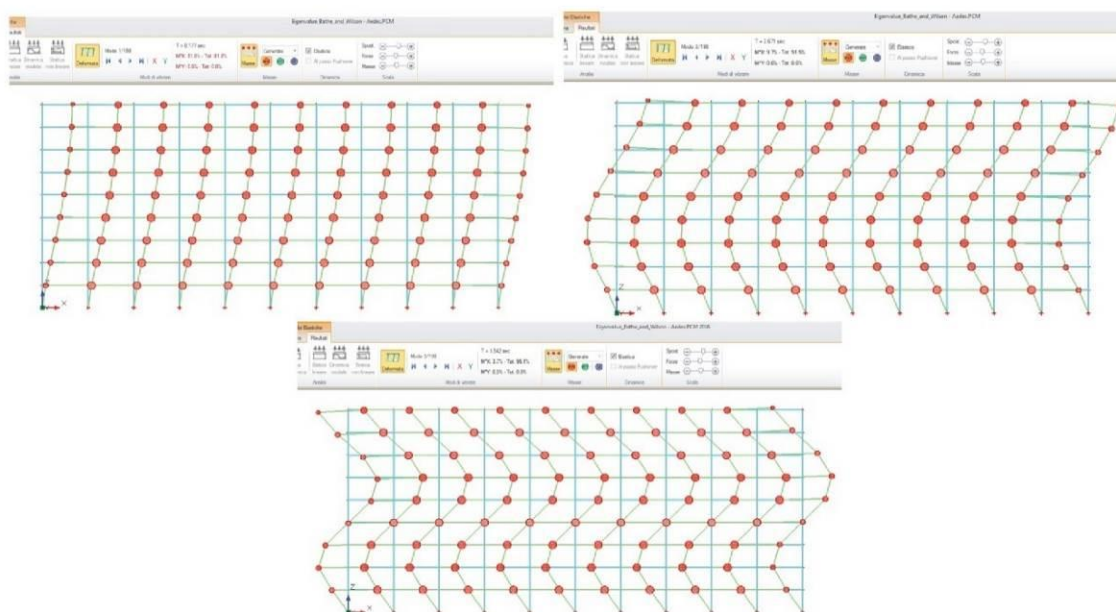


Fig. 3.1.2. Modi di vibrare: 1° (sinistra, in alto), 2° (a destra), 3° (in basso)

COMUNE DI MONTONE

D.G.R. N. 1001 del 06/09/2016 - Interventi di prevenzione del rischio sismico su edifici pubblici strategici o rilevanti ex art. 2 co. 1 lett. b dell'OCDPC n. 293/15

**Verifica di vulnerabilità sismica e Interventi di miglioramento sismico
PALAZZO COMUNALE****PROGETTO ESECUTIVO
PROGETTO STRUTTURALE**
Relazione sintetica

S-R6_e01

rev_00

pagina 27 di 27

Confronto con ETABS:

Modo	Autovalore	Frequenza	Periodo	Masse modali	efficaci	Totale	progressivo %	Quote masse modali	efficaci
1	0.590	0.122	8.177	81.788	0.000	81.788	0.000	18.585	0.000
2	5.540	0.375	2.669	9.689	0.000	91.477	0.000	15.240	0.000
3	16.620	0.649	1.541	3.675	0.000	95.152	0.000	15.042	0.000

Confronto fra PCM, SAP e ETABS:

Modo	Autovalore PCM	Autovalore SAP	Autovalore PCM	Autovalore ETABS
1	0.590	0.590	0.590	0.590
2	5.535	5.527	5.540	5.532
3	16.613	16.588	16.620	16.596

La comparazione è ottima, anche in considerazione dell'approssimazione generata dalla sezione rettangolare avente proprietà di area e inerzia che risultano equivalenti alla sezione qualsiasi definita negli esempi di riferimento, a meno di errori di arrotondamento.