



# Uso dei software di calcolo nella verifica sismica delle strutture

## v1.0

Prodotto della ricerca nell'ambito del Task 10.3 -  
*Validazione/confronto strumenti software per  
l'applicazione dei metodi di verifica da norma*

del Progetto ReLUIIS (accordo quadro con il Dipartimento  
della Protezione Civile 2019-2021)

**Novembre 2020**

## GRUPPO DI LAVORO

### *Per l'esecuzione delle analisi e la redazione dei capitoli*

#### **UniGE (Università di Genova)**

*Responsabile Scientifico e Coordinatore dell'attività: Prof. S. Cattari*

*Collaboratori: S. Degli Abbatì, D. Ottonelli*

#### **UniPV (Università di Pavia)**

*Responsabile Scientifico e Coordinatore del WP10: Prof. G. Magenes*

*Collaboratori: C.F. Manzini, P. Morandi*

#### **UniCH (Università di Chieti-Pescara)**

*Responsabile Scientifico: Prof. G. Camata*

*Collaboratori: Prof. E. Spacone, C. Marano*

#### **UniCT-a (Università di Catania)**

*Responsabile Scientifico: Prof. I. Calì*

*Collaboratori: B. Pantò, F. Canizzaro, G. Occhipinti*

#### **UniNA-d (Università Federico II di Napoli)**

*Responsabile Scientifico: Prof. B. Calderoni*

*Collaboratori: A.E. Cordasco*

#### **UniBO (Università di Bologna)**

*Responsabile Scientifico: Prof. S. de Miranda*

*Collaboratori: G. Castellazzi, A.M. D'Altri*

#### **IUAV (Università di Venezia)**

*Responsabile Scientifico: Prof. A. Saetta*

*Collaboratori: L. Berto, A. Doria, D. Talledo*

### *Per la revisione del documento*

*Prof. G. Milani (POLIMI - Politecnico di Milano)*

## PREFAZIONE

Come è stato più volte confermato dai terremoti che negli ultimi decenni hanno colpito il territorio italiano, e come è ben noto a chi si occupa di questi temi, il rischio sismico in Italia è condizionato in larga misura dall'elevata vulnerabilità del patrimonio edilizio in muratura. Per la sua riduzione è perciò necessario intervenire sugli edifici con struttura in muratura, attraverso progetti ben calibrati, che scaturiscano da una complessiva comprensione del loro complesso comportamento sotto azioni sismiche e ne tengano correttamente ed esaustivamente conto mediante adeguate valutazioni numeriche.

Oggi, infatti, una buona progettazione antisismica non può prescindere da una corretta valutazione della sicurezza, che a sua volta richiede una attenta modellazione dell'edificio soggetto al terremoto ed una adeguata capacità di analisi in campo non lineare. D'altra parte, le potenzialità di calcolo oggi a disposizione del progettista portano spesso all'adozione di modelli complessi, che, fornendo una riproduzione geometricamente molto accurata delle strutture murarie, possono dare l'illusione che anche i risultati, dipendenti in realtà da alcuni aspetti peculiari e di dettaglio della modellazione meccanica, riproducano accuratamente i variegati comportamenti delle strutture murarie. Spesso, poi, i programmi di calcolo specialistici propongono delle modalità di modellazione predefinite, che possono portare il progettista a non valutare attentamente se le ipotesi su cui si basano tali modellazioni siano in grado di riprodurre con la necessaria fedeltà i comportamenti dello specifico edificio in esame, stante la grande varietà delle tipologie di edifici, di murature, di orizzontamenti e di coperture che caratterizza il patrimonio edilizio italiano. D'altra parte, la tendenza a rendere sempre più facile e più rapido l'uso dei programmi di calcolo specialistici porta il progettista ancor più a ignorare le scelte di base fatte dall'autore del programma, favorendone il possibile, ma purtroppo frequente, uso improprio. Per questo è particolarmente importante che il progettista, sia che usi programmi agli elementi finiti di tipo generale, sia che usi programmi specialistici che modellano direttamente gli elementi strutturali degli edifici in muratura, possa fare le scelte più adeguate o almeno essere cosciente delle scelte di modellazione automaticamente adottate dal programma, eventualmente scegliendo le opzioni disponibili che ne ottimizzino l'uso per la modellazione del problema in esame.

Il Dipartimento della Protezione Civile, nell'ambito delle sue attività di prevenzione, fin dal 2004 promuove e supporta finanziariamente studi teorici, numerici e sperimentali di laboratorio sul rischio sismico e sulla sua riduzione. Tra essi, in tale ottica, quelli relativi al comportamento e alla modellazione degli edifici in muratura.

Queste linee guida sono il frutto del lungo processo di crescita della conoscenza e accumulo di esperienze avvenuto in Italia e, particolarmente, all'interno del Consorzio ReLUIIS (Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica e strutturale), Centro di competenza del Dipartimento della Protezione Civile. Esse hanno il pregio di accompagnare il lettore nella comprensione teorica del comportamento e della modellazione degli elementi e dei sottoinsiemi strutturali, fino all'intera struttura, fornendo al contempo una serie di esempi benchmark che consentono una verifica concreta dei concetti espressi nelle parti teoriche e un confronto dei riflessi delle possibili diverse scelte di modellazione sui risultati ottenibili con i diversi programmi di calcolo. La qualità dei contenuti è garantita dall'indiscussa competenza degli autori, derivante dalle specifiche attività di ricerca teorica e sperimentale sul comportamento sismico degli edifici in muratura da loro effettuate, in particolare negli ultimi due decenni.

**Mauro Dolce**

*Direttore Generale – Dipartimento della Protezione Civile*

*Ordinario di Tecnica delle Costruzioni – Università di Napoli Federico II*

# INDICE

<b>1</b>	<b>OBIETTIVI, MODALITA' OPERATIVE ADOTTATE E STRUTTURA DEL DOCUMENTO...</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE.....</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>ASPETTI CRITICI NELLA MODELLAZIONE E USO DI CODICI DI CALCOLO.....</b>	<b>17</b>
3.1	Modelli per i diversi componenti strutturali dell'edificio .....	17
3.1.1	Pannelli murari.....	19
3.1.1.1	Maschi murari .....	19
3.1.1.2	Fasce murarie.....	21
3.1.2	Solai .....	23
3.2	Elaborazione del modello.....	26
3.2.1	Modellazione della parete muraria.....	26
3.2.1.1	Aspetti peculiari dei modelli a telaio equivalente .....	27
3.2.1.2	Aspetti peculiari dei modelli al continuo.....	29
3.2.2	Modellazione dei solai .....	30
3.2.3	Modellazione delle connessioni (parete-parete e solaio-parete).....	30
3.3	Esecuzione dell'analisi.....	32
3.4	Fasi di verifica .....	33
3.4.1	Aspetti peculiari dei modelli FEM al continuo.....	33
3.4.2	Aspetti peculiari dei modelli a telaio .....	33
<b>4</b>	<b>CRITERI DI CONTROLLO DELL'AFFIDABILITÀ DEI RISULTATI .....</b>	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>ANALISI DELLE STRUTTURE BENCHMARK .....</b>	<b>38</b>
5.1	Quadro delle caratteristiche dei software adottati .....	38
5.2	Modalità di rappresentazione adottate nei confronti ed interpretazione dei risultati 46	
5.2.1	Parametri utilizzati nei confronti.....	47
5.3	Struttura benchmark n° 1 – Singolo pannello .....	59
5.3.1	Struttura benchmark n°1a – pannello in muratura di pietra .....	60
5.3.2	Struttura benchmark n°1b – pannello in muratura di mattoni.....	63
5.4	Struttura benchmark n° 2 – Trilite.....	66
5.5	Struttura benchmark n° 3 – Parete 2D multipiano .....	73
5.5.1	Confronto delle masse totali e dello sforzo normale agente nei maschi siti al piano terra a seguito dell'applicazione dei carichi gravitazionali.....	75
5.5.2	Confronto delle curve <i>pushover</i> globali e delle relative bilineari equivalenti.....	78
5.5.3	Variazione percentuale delle tre grandezze che definiscono la bilineare equivalente.....	81

5.5.4	Confronto della variazione dello sforzo normale nei maschi siti al piano terra.....	82
5.5.5	Confronto della modalità di rottura predetta dai software in corrispondenza dello spostamento ultimo per i maschi e le fasce ai vari livelli.....	84
5.5.6	Confronto delle curve taglio-spostamento dei maschi siti al piano terra.....	92
5.6	Struttura benchmark n° 4 – Edificio monocellula bipiano.....	95
5.6.1	Confronto delle masse totali e variazione percentuale dello sforzo normale agente nei maschi del piano terra a seguito dell'applicazione dei carichi gravitazionali.....	99
5.6.2	Confronto delle curve <i>pushover</i> globali .....	102
5.6.3	Variazione percentuale delle tre grandezze che definiscono la bilineare equivalente...103	
5.6.4	Confronto della variazione dello sforzo normale nei maschi siti al piano terra della parete di Tipo A .....	106
5.6.5	Confronto della modalità di rottura predetta dai software in corrispondenza dello spostamento ultimo per i maschi e le fasce ai vari livelli .....	110
5.7	Struttura benchmark n° 5 – Edificio complesso.....	115
5.7.1	Confronto delle masse totali.....	116
5.7.2	Confronto dei parametri dinamici stimati dall'analisi modale.....	118
5.7.3	Confronto delle curve <i>pushover</i> globali .....	126
5.7.4	Variazione percentuale delle tre grandezze che definiscono la bilineare equivalente...129	
5.7.5	Confronto della modalità di rottura predetta dai software .....	134
5.7.6	Calcolo dell'accelerazione massima compatibile con vari stati limite .....	152

## **RIFERIMENTI DEI SOFTWARE IMPIEGATI NELLA RICERCA**

## **ULTERIORE BIBLIOGRAFIA DEL GRUPPO DI LAVORO**

### **ALLEGATO I – Schede delle Strutture Benchmark**

### **ALLEGATO II – Schede di Approfondimento**

# **ALLEGATO I**

**SCHEDE DELLE STRUTTURE BENCHMARK**

## ELENCO DELLE SCHEDE

### **Struttura benchmark n° 1**

*Singolo pannello*

### **Struttura benchmark n° 2**

*Trilite*

### **Struttura benchmark n° 3**

*Parete 2D multipiano*

### **Struttura benchmark n° 4**

*Struttura 3D rappresentativa di un edificio semplice mono-cellula bi-piano*

### **Struttura benchmark n° 5**

*Struttura 3D rappresentativa di un edificio complesso ispirato ad uno reale*

# **ALLEGATO II**

**SCHEDE DI APPROFONDIMENTO**



## ELENCO DELLE SCHEDE

### Scheda di Approfondimento A

*Calibrazione parametri meccanici*

### Scheda di Approfondimento B

*Identificazione della geometria degli elementi strutturali nei modelli a telaio equivalente*

### Scheda di Approfondimento C

*Contributo a pressoflessione fuori piano nei modelli a telaio equivalente*

### Scheda di Approfondimento D

*Ruolo delle modalità adottate nei modelli a telaio per gestire l'accoppiamento di pareti incidenti*

### Scheda di Approfondimento E

*Sensibilità della curva pushover all'applicazione delle azioni concentrate a livello di piano o distribuite*

### Scheda di Approfondimento F

*Controlli sulla distribuzione dei carichi e delle masse strutturali*

### Scheda di Approfondimento G

*Controlli di coerenza sull'implementazione di pannelli murari con comportamento bilineare elastico perfettamente plastico*

### Scheda di Approfondimento H

*Controllo di coerenza della evoluzione della cerniera plastica*

### Scheda di Approfondimento I

*Calcolo analitico di un limite superiore alla soluzione numerica secondo l'ipotesi ideale "shear-type"*