



CNA
PPC

CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI ARCHITETTI
PIANIFICATORI
PAESAGGISTI
E CONSERVATORI

WEBINAR N.2 (3 CFP)

venerdì 14.02.2025 – ore 15.30

Edilizia storica

MODELLAZIONE E CALCOLO DEGLI EDIFICI IN MURATURA

Guido Magenes, Serena Cattari



DIPARTIMENTO
INGEGNERIA
CIVILE
ARCHITETTURA



Università
di Genova

DICCA DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA
E AMBIENTALE

PREMESSA

La **valutazione della sicurezza e/o il progetto dell'intervento in edifici in muratura** deve basarsi su **un'adeguata comprensione del loro comportamento** sotto azioni sismiche e deve tenerne correttamente conto mediante adeguate modellazioni e valutazioni numeriche.

L'edificio murario è un oggetto **molto complesso**, caratterizzato da tridimensionalità, disomogeneità, anisotropia, non linearità costitutiva e geometrica...

L'uso dell'**analisi non lineare**, soprattutto nella valutazione dell'esistente, è **sempre più diffuso** come naturale conseguenza dell'evoluzione degli studi sulla risposta sismica delle strutture, che è dominata non solo da rigidità iniziale e resistenza in forza, ma anche dalla capacità di deformazione e di spostamento in campo non lineare.

PREMESSA (segue)

Negli ultimi decenni vi è stata una **notevole evoluzione degli strumenti di calcolo** ed è aumentata la disponibilità di **software molto potenti** che consentono la definizione di modelli geometricamente molto accurati di strutture murarie anche complesse, che possono dare l'illusione che anche i risultati siano altrettanto accurati, quando in realtà dipendono fortemente da alcuni aspetti specifici e di dettaglio della modellazione meccanica.

Il pur notevole progresso del software non consente ancora di affrontare con un unico approccio di modellazione tutti problemi strutturali, per cui sono spesso ancora necessarie delle semplificazioni ed approssimazioni adatte al problema specifico in esame, ed esiste una diversificazione degli approcci di modellazione.

Molteplicità di modelli e approcci

FEM and DEM

Two-dimensional finite elements

Three-dimensional finite elements

EF

Plastic hinge with zero length

Plastic hinge with finite length

Fiber section

Two-dimensional discrete elements

MBM - LA

FEM – Finite Element Model – Elementi Finiti
DEM – Discrete Element Model – Elementi Discreti
EF – Equivalent Frame - Telaio Equivalente
MBM – Macro-Block Model – Modelli a Macro-Blocchi
LA – Limit Analysis – Analisi Limite

Uso dei software di calcolo nella verifica sismica degli edifici in muratura

*Task 10.3 - Validazione/confronto strumenti software per l'applicazione dei metodi di verifica
da norma*

Progetto DPC- ReLUIS (2014-2024)

IL «PROGETTO BENCHMARK» - MODELLAZIONE E ANALISI NONLINEARE DI EDIFICI IN MURATURA

a cura di

Serena Cattari - Professore di Tecnica delle Costruzioni

Università degli Studi di Genova



**Università
di Genova**

DICCA DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA
E AMBIENTALE

Guido Magenes- Professore di Tecnica delle Costruzioni

Università degli Studi di Pavia



DIPARTIMENTO
INGEGNERIA
CIVILE
ARCHITETTURA **dicAr**

Origine del «Progetto Benchmark»

Primi studi a partire dal PE DPC-Reluis 2014-2018 come subtask della linea di ricerca “Strutture in muratura” coordinata S.Lagomarsino, G.Magenes, C.Modena (a cui è poi subentrata F. da Porto), mossi dalla consapevolezza della dispersione che possono avere i risultati delle analisi con gli strumenti di calcolo automatico e della necessità di dare dei riferimenti alla comunità professionale per poter operare consapevolmente.

Obiettivo: l’analisi di esempi di riferimento (strutture benchmark) per la valutazione dell’affidabilità dei risultati ottenuti con codici di calcolo mirati all’analisi sismica delle costruzioni in muratura.

Studi ripresi e portati a finalizzazione nei PE 2019-2021, 2022-2024 nel WP10 “Contributi normativi relativi alle costruzioni in muratura» coordinato da G.Magenes con un task specifico (10.3), coordinato da Serena Cattari (Università di Genova).

2014-2024



UniGE (Università di Genova)

Prof S.Cattari (Task Leader)

RU: S.Degli Abbati, D.Ottonelli, S.Alfano



UniPV (Università di Pavia)

Prof G.Magenes (WP Leader)

RU: C.F.Manzini, P.Morandi



UniCH (Università di Chieti-Pescara)

Prof G.Camata

RU: F.Cantagallo, A. Di Primio, C.Marano,
M.Petracca



UniCT (Università di Catania)

Prof I.Caliò

RU: B.Pantò, F.Canizzaro, G. Occhipinti



UniNA (Università Federico II Napoli)

Prof B.Calderoni, G.Brandonisio,

RU: A.E. Cordasco, G.Pacella, A.Sandoli

UniNA (Università Federico II Napoli)

Prof F.Parisi

RU: V. Buonocunto, E.Acconcia



UniBO (Università di Bologna)

Prof S.De Miranda

RU: G.Castellazzi, A.M.D'Altri,



IUAV (University of Venice)

Prof A. Saetta

RU:L.Berto, A. Doria, D.Talledo



POLIMI (Politecnico of Milan)

Prof G.Milani

RU:L.C. da Silva



Universidade do Minho (Portogallo)

Prof P.Lourenço

RU: R.Marques, F.Parisse

Uso dei software di calcolo nella verifica sismica degli edifici in muratura

v3.0

a cura di
Serena Cattari
Guido Magenes



LIBERAMENTE SCARICABILE DA :
<https://www.reluis.it/divulgazione/publicazioni/>

ULTERIORI APPROFONDIMENTI: <https://link.springer.com/journal/10518/volumes-and-issues/20-4>

OBIETTIVI, MODALITA' OPERATIVE ADOTTATE E STRUTTURA DEL DOCUMENTO

Fonti di dispersione dei risultati ottenibili al variare di diverse strategie di modellazione e analisi eseguite da diversi analisti e/o con diversi software:

- **Le incertezze e l'incompleta conoscenza** che intrinsecamente caratterizzano il processo di valutazione di sicurezza degli edifici esistenti possono portare a diverse scelte nella fase di modellazione e analisi.
- **La strategia di modellazione**, ossia il processo di idealizzazione della struttura reale nel corrispondente modello di calcolo: diversi sono gli approcci e i legami costitutivi disponibili che, con diversi gradi di approssimazione, consentono di descrivere il comportamento del costruito in muratura. E' necessaria consapevolezza dei limiti di validità degli strumenti utilizzati nel descrivere l'edificio o il sottosistema di volta in volta esaminato.
- **I metodi di analisi** adottati: ad esempio l'uso di analisi lineari o non lineari; i metodi non lineari implicano la dipendenza della soluzione da ulteriori fattori, quali gli algoritmi di convergenza o di risoluzione del problema non lineare
- **L'utilizzo degli stessi software**. Non solo diversi software possono portare a risultati differenti ma anche la diversa modalità di utilizzo di uno stesso software può portare a diversi risultati (uso più o meno avanzato, più o meno consapevole)

OBIETTIVI, MODALITA' OPERATIVE ADOTTATE E STRUTTURA DEL DOCUMENTO (segue)

Contesto normativo (NTC 2018)

E' responsabilità del progettista “controllare l'affidabilità dei codici utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti”.

“Il progettista dovrà riesaminare preliminarmente la documentazione a corredo del software per valutarne l'affidabilità e soprattutto l'idoneità al caso specifico”.

Infine in merito al giudizio motivato di accettabilità dei risultati (§10.2.1 delle NTC2018) è precisato che “spetta al progettista il compito di sottoporre i risultati delle elaborazioni a controlli che ne comprovino l'attendibilità” (ad esempio attraverso il confronto con i risultati di semplici calcoli).

Esigenze:

- Sensibilizzazione dei professionisti ad un uso il più possibile consapevole dei software commerciali.
- Disponibilità di un percorso metodologico utile al professionista per verificare la qualità e correttezza delle soluzioni ottenute dai codici di calcolo.

OBIETTIVI, MODALITA' OPERATIVE ADOTTATE E STRUTTURA DEL DOCUMENTO (segue)

Contenuti del documento in sintesi:

- Disamina sintetica degli aspetti ritenuti più critici nella modellazione e nell'uso dei software di calcolo
- Messa a disposizione di strumenti operativi, ovvero esempi (strutture benchmark) analizzati dalle varie UR coinvolte con diversi software commerciali. Le strutture benchmark, di diversa complessità, sono concepite e presentate in modo tale che possano essere riprodotte da terzi (ove possibile corredate da esempi di calcoli manuali).

I software utilizzati sono elencati nel documento. Tuttavia lo scopo non è quello di esprimere un giudizio di merito sui software specifici, si è quindi cercato di privilegiare la presentazione dei risultati in forma «anonima», ove possibile.

Ambito di applicazione: muratura semplice (tipica dell'edilizia esistente; non armata, non confinata), analisi statica non lineare di tipo globale (risposta governata dalla risposta nel piano delle pareti).

Programmi di calcolo utilizzati:

Modellazione FEM 3D (meso- e micro-modellazione)

- ABAQUS Release 6.19
- DIANA v.10.7 e 10.8
- LUSAS v.19.0
- MIDAS FEA 2017
- OpenSees3.0.3 con pre e post-processore Scientific Toolkit for Opensees (STKO)

A macroelementi discreti piani

- 3DMacro

A telaio equivalente

- AEDES PCM 2018
- ANDILWall / PRO_SAM (motore di calcolo: SAM-II)
- CDS (CDMaWin 2018)
- 3Muri Release 10.9.1.7
- MIDAS Gen (Release 18)
- SAP 2000

La scelta dei software riflette gli strumenti a disposizione delle UR coinvolte nella ricerca e al contempo vuole essere realistica rispetto agli strumenti impiegati nella pratica professionale

OBIETTIVI, MODALITA' OPERATIVE ADOTTATE E STRUTTURA DEL DOCUMENTO (segue)

Modalità operative:

- Negli esempi di calcolo si è cercato di limitare il più possibile la dispersione dei risultati dovuti a scelte arbitrarie nei dati di partenza o a scelte non omogenee di modellazione da parte dei diversi analisti al fine di fare valutazioni, per quanto possibile, «a parità di ipotesi di modellazione».
- La descrizione dei dati di input di ciascun esempio è quindi molto dettagliata, così come viene proposto un elenco di dati di output necessari per sistematizzare i confronti.
- Sono esemplificati:
 - controlli volti ad evitare errori grossolani*, derivanti da un errato inserimento dei parametri del modello nel *software* di calcolo (massa totale, equilibri, etc...)
 - calcoli manuali* che possano supportare il giudizio motivato di accettabilità dei risultati (ad es. un limite superiore della resistenza valutato in modo semplificato)

OBIETTIVI, MODALITA' OPERATIVE ADOTTATE E STRUTTURA DEL DOCUMENTO (segue)

Struttura del documento

- Sezione 1: Obiettivi, modalità operative, struttura del documento
- Sezione 2: Definizione delle strutture benchmark proposte
- Sezione 3: Analisi ed illustrazione degli aspetti critici nella modellazione e uso di codici di calcolo
 - Classificazione degli approcci di modellazione
 - Aspetti pratici inerenti la fase di elaborazione/costruzione del modello
 - Aspetti pratici inerenti le fasi di esecuzione delle analisi
 - Aspetti pratici inerenti le fasi di verifica
- Sezione 4: Criteri di controllo dell'affidabilità dei risultati
- Sezione 5: Analisi delle strutture benchmark e confronti critici
- Allegato I: Schede delle strutture benchmark (descrizione, dati di input)
- Allegato II: Schede di approfondimento

Ogni sezione è corredata con una bibliografia di riferimento

OBIETTIVI, MODALITA' OPERATIVE ADOTTATE E STRUTTURA DEL DOCUMENTO (segue)

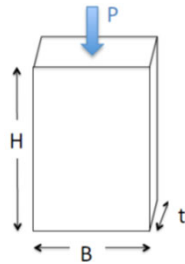
Allegato II: Schede di approfondimento (231 pagine):

- **Scheda A** – Calibrazione dei parametri meccanici
- **Scheda B** – Identificazione della geometria degli elementi strutturali nei modelli a telaio equivalente
- **Scheda C** – Contributo a pressoflessione fuori piano nei modelli a telaio equivalente
- **Scheda D** – Ruolo delle modalità adottate nei modelli a telaio per gestire l'accoppiamento di pareti incidenti
- **Scheda E** – Sensibilità della curva pushover all'applicazione delle azioni concentrate a livello di piano o distribuite
- **Scheda F** – Controlli sulla distribuzione dei carichi e delle masse strutturali
- **Scheda G** – Controlli di coerenza sull'implementazione di pannelli murari con comportamento bilineare elastico perfettamente plastico
- **Scheda H** – Controllo di coerenza della evoluzione della cerniera plastica
- **Scheda I** – Calcolo analitico di un limite superiore alla soluzione numerica secondo l'ipotesi ideale "*shear-type*"
- **Scheda J** – Procedure di controllo per valutare l'affidabilità dei risultati di analisi statiche nonlineari ottenute con modelli al continuo o micro-meccanici

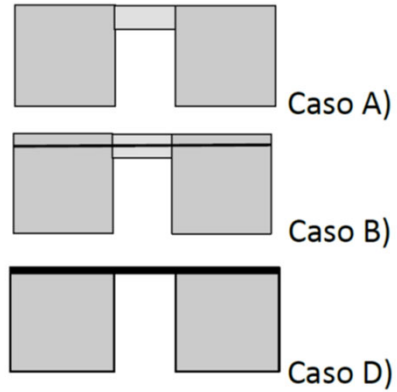
STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE

Le strutture benchmark proposte sono sette, di diverso livello di complessità

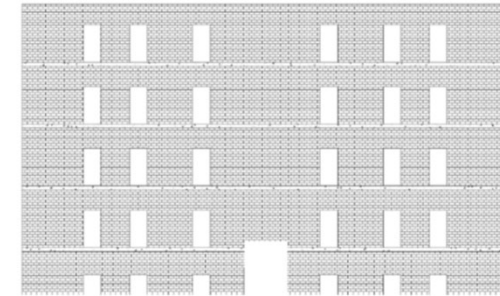
Singolo pannello



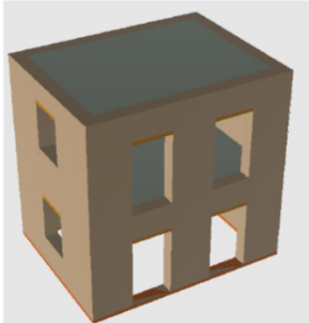
Trilite



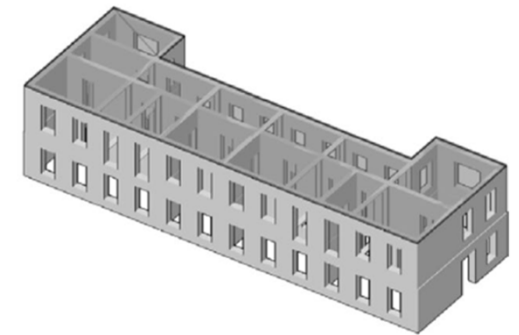
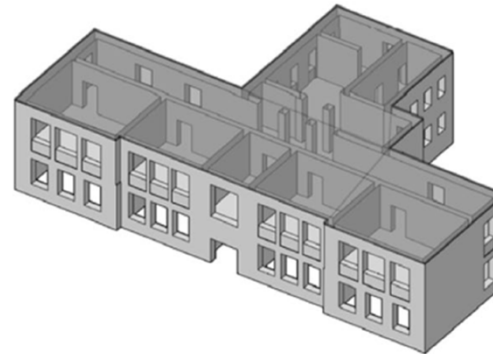
Parete 2D multipiano



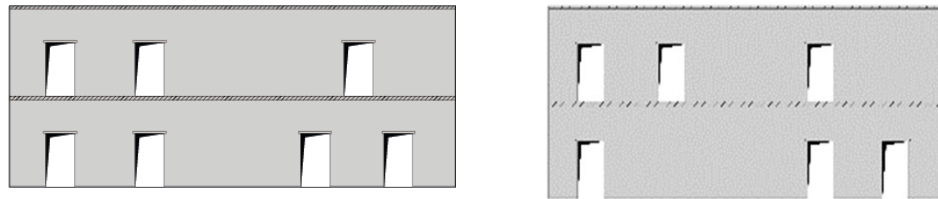
Edificio mono-cellula bipiano



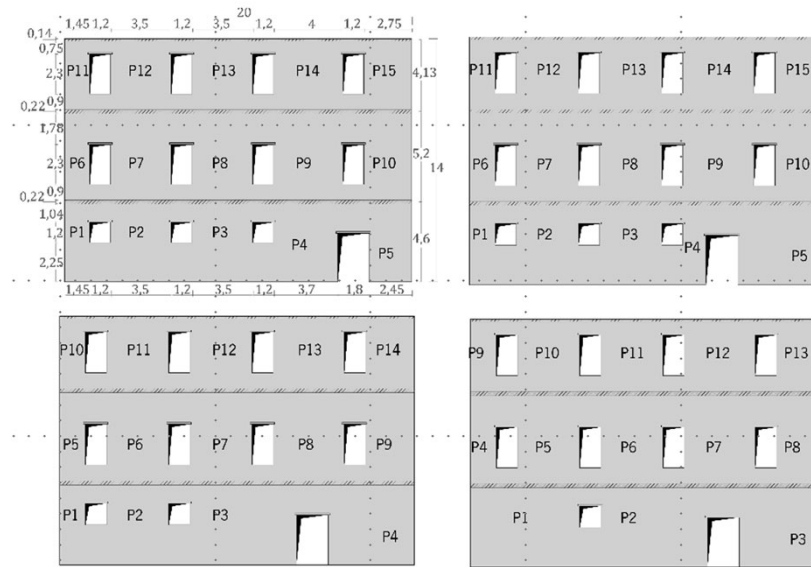
Edifici complessi



Alle sei strutture benchmark precedenti si aggiunge il settimo esempio costituito da pareti piane ed analizzate in 2D (nel piano) variando parametricamente la geometria:

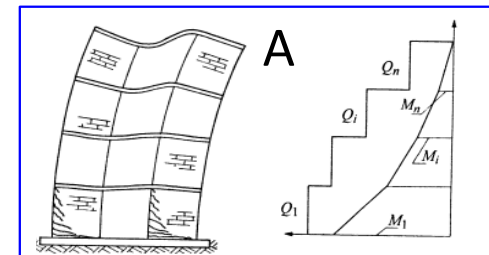
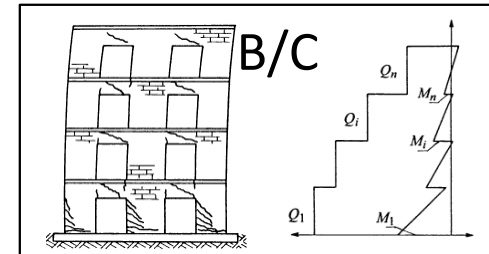
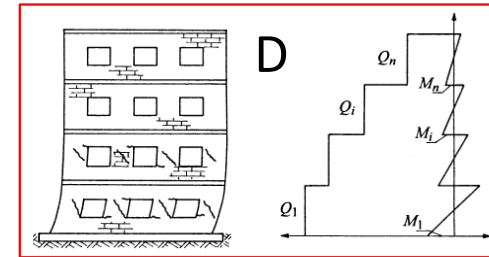
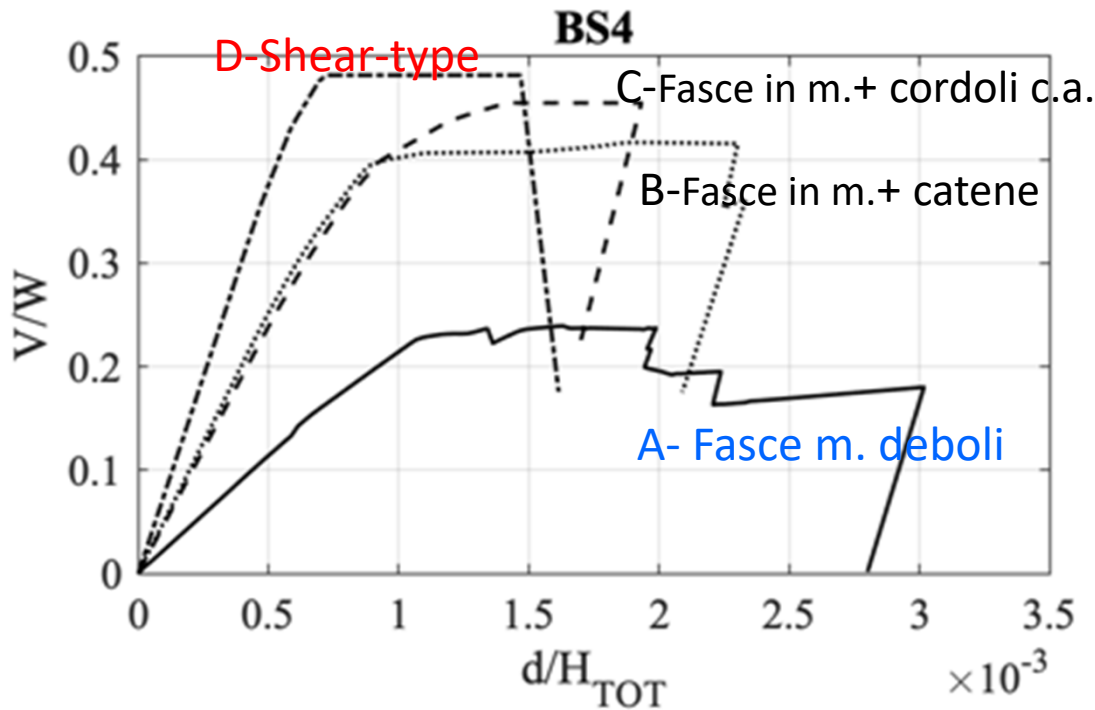


P1



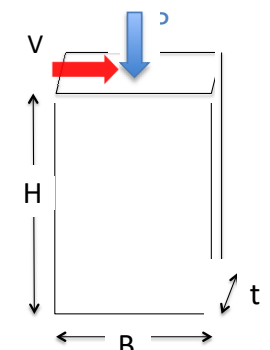
P2

Analisi degli esempi con variazione delle ipotesi di modellazione



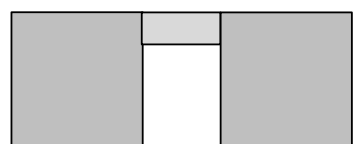
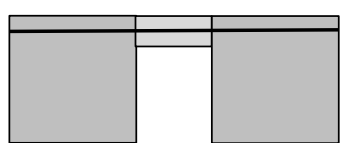
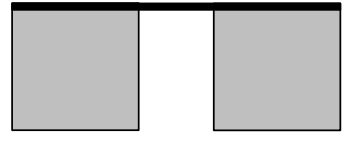
STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE (segue)

Struttura 1

Struttura benchmark	Varianti analizzate	Finalità
 <p>Singolo pannello Scheda benchmark 1</p>	<p>1a - In pietra a spacco di fissata geometria al variare di due condizioni di vincolo: Caso I: incastro Caso II: mensola</p> <hr/> <p>1b - In mattoni pieni e malta di calce per fissato vincolo (rotazione fissata all'estremo superiore) al variare di due diversi rapporti di snellezza: Caso I - snellezza 1.35 Caso II - snellezza 2</p>	<p>Sviluppare padronanza dei fattori da cui dipendono i domini di resistenza usualmente proposti in letteratura e adottati nelle norme per interpretare la risposta dei pannelli murari di tipo maschio (parametri meccanici, sforzo normale, schema statico e condizioni di vincolo, snellezza H/B).</p>

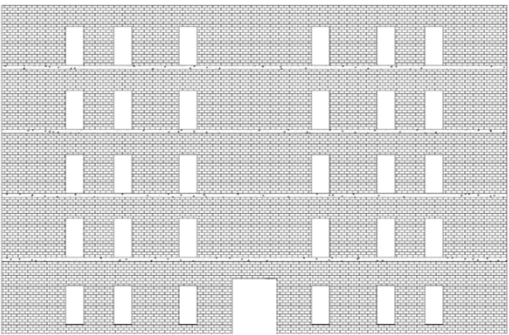
STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE (segue)

Struttura 2

Struttura benchmark	Varianti analizzate	Finalità
<p style="text-align: center;">Trilite</p>  <p style="text-align: right;">Caso A)</p>  <p style="text-align: right;">Caso B)</p>  <p style="text-align: right;">Caso D)</p> <p style="text-align: center;">Scheda benchmark 2</p>	<p>Al variare di diverse configurazioni dell'elemento di collegamento tra i due maschi murari e della geometria dell'apertura</p> <p>Caso A) l'apertura è di geometria prefissata e la fascia è in assenza di elemento resistente a trazione accoppiato</p> <p>Caso B) l'apertura è di geometria prefissata e la fascia è accoppiata ad una catena</p> <p>Caso D): l'apertura è a tutta altezza ed è presente una trave di accoppiamento dei maschi (infinitamente rigida sia flessionalmente che assialmente)</p>	<p>Sviluppare padronanza sul ruolo dello sforzo normale e della sua variazione nella determinazione della resistenza di pannelli murari (in particolare maschi); dell'interazione tra pannelli murari di tipo maschio e fascia; del ruolo di elementi di collegamento tra maschi murari.</p>

- A - non sono presenti elementi resistenti a trazione accoppiati alla fascia;
- B - la fascia è accoppiata ad una catena, disposta alla quota dei solai;
- C - la fascia è accoppiata a cordoli di piano in calcestruzzo armato (c.a.), disposti alla quota dei solai.
- D - i maschi murari sono accoppiati da una trave infinitamente rigida sia flessionalmente che assialmente; la rotazione della trave nel suo piano è impedita. Questa condizione mira a simulare quella ideale di "shear type".

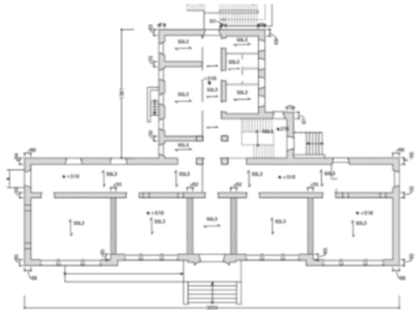
Struttura 3

Struttura benchmark	Varianti analizzate	Finalità
<p>Parete 2D multipiano</p>  <p>Scheda benchmark 3</p>	<p>Al variare di diverse ipotesi sui dettagli costruttivi (presenza o meno di cordoli) e sulle strategie di modellazione (lunghezza efficace dei cordoli)</p>	<p>Analisi degli effetti di accoppiamento tra maschio e fascia nel sistema parete al variare di diversi dettagli costruttivi. La presenza o meno di un elemento resistente a trazione accoppiato alla fascia ne altera significativamente la risposta (soprattutto nel passaggio dal caso A a C). Rispetto al caso del trilito alcuni effetti risultano più marcati.</p>
	<p>Caso A) parete composta da maschi e fasce murarie non accoppiate ad altri elementi resistenti a trazione</p>	
	<p>Caso C) parete composta da maschi e fasce murarie accoppiate a cordoli di piano in c.a. e lunghezza deformabile dei cordoli di piano pari alla lunghezza totale</p>	
	<p>Caso C Bis) parete composta da maschi e fasce murarie accoppiate a cordoli di piano in c.a. e lunghezza deformabile dei cordoli di piano pari alla luce netta delle corrispondenti aperture</p>	

Struttura 4

Tipologia di struttura	Varianti analizzate	Finalità
<p data-bbox="360 651 766 683">Edificio mono-cellula bipiano</p>  <p data-bbox="338 967 788 999"><i>si veda la Scheda benchmark 4</i></p>	<p data-bbox="831 536 1417 735">Al variare di diverse disposizioni di aperture (regolare e irregolare) sui quattro lati e diverse configurazioni della fascia (senza o con elementi resistenti a trazione accoppiati):</p> <p data-bbox="831 743 1417 815">Caso A) fasce non accoppiate ad altri elementi resistenti a trazione</p> <p data-bbox="831 823 1417 863">Caso B) fasce accoppiate a catene</p> <p data-bbox="831 871 1417 911">Caso C) fasce accoppiate a cordoli in ca</p> <p data-bbox="831 919 1417 1110">Caso D) presenza di elementi infinitamente rigidi flessionalmente ed assialmente a livello di piano; la rotazione della trave nel suo piano è impedita – “shear type”</p>	<p data-bbox="1458 683 1910 967">Analisi degli effetti di accoppiamento maschio-fascia a livello del sistema parete. Effetti sulla risposta 3D (torsionali e conseguenti all'accoppiamento delle pareti fornito dal sistema solaio).</p>

Struttura 5

Tipologia di struttura	Varianti analizzate	Finalità
<p>Edificio complesso</p>  <p><i>si veda la Scheda benchmark 5</i></p>	<p>Al variare di diverse ipotesi sui dettagli costruttivi (presenza o meno di cordoli)</p> <p>Caso A) fasce non accoppiate ad altri elementi resistenti a trazione</p> <p>Caso C) fasce accoppiate ad elementi resistenti a trazione costituiti da cordoli (**)</p>	<p>Analisi della risposta 3D di una struttura ispirata alla geometria di un edificio reale.</p>

La struttura si ispira alla geometria di un edificio reale, la scuola “P. Capuzi” di Visso (MC), gravemente danneggiata a seguito degli eventi sismici che hanno interessato il Centro Italia nel 2016/2017 e che oggi risulta demolita.

STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE (segue)

Scuola «P.Capuzi» di Visso (MC)



Restituzione del quadro di danno della Scuola P.Capuzi di Visso (secondo i dati raccolti da S.Cattari e D.Sivori a seguito di un sopralluogo effettuato in data 8 dicembre 2016)

STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE (segue)

Struttura 5

<p>24 Agosto 2016</p>			<p>a.</p>
<p>26 Ottobre 2016</p>			<p>b.</p>
<p>30 Ottobre 2016</p>			<p>c.</p>

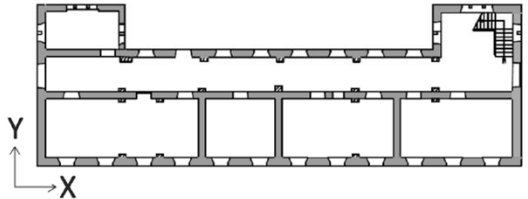
Struttura 5

<p>Al 24 Agosto 2016</p>		
<p>Al 8 Dicembre 2016</p>		
		

Possibilità di un confronto del quadro del danno stimato dai programmi di calcolo impiegati con quello osservato.

Sulla curva di capacità ottenuta dalle analisi statiche non-lineari sono identificabili progressivi stati limite associabili all'evoluzione in campo non-lineare della risposta, che potranno essere confrontati con lo scenario di danno occorso.

Struttura 6

Tipologia di struttura	Varianti analizzate	Finalità
<p style="text-align: center;">Edificio complesso</p>  <p style="text-align: center;">si veda la Scheda benchmark 6</p>	<p>Caso C) fasce accoppiate ad elementi resistenti a trazione costituiti da cordoli</p>	<p>Analisi della risposta 3D di una struttura ispirata alla geometria di un edificio reale</p> <p>Considerazioni circa l'affidabilità dei modelli in campo elastico, grazie alla disponibilità di dati di identificazione dinamica messi a disposizione dall'Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS) del Dipartimento di Protezione Civile (DPC)</p>

La struttura si ispira alla geometria di un edificio reale, il *Municipio di Pizzoli (AQ)*, che ha subito un danneggiamento medio-lieve a seguito degli degli eventi sismici che hanno interessato il Centro Italia nel 2016/2017.

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

LA PAROLA ALLA PROF. SERENA CATTARI...



CNA
PPC

CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI ARCHITETTI
PIANIFICATORI
PAESAGGISTI
E CONSERVATORI

WEBINAR N.2 (3 CFP)

venerdì 14.02.2025 – ore 15.30

Edilizia storica

MODELLAZIONE E CALCOLO DEGLI EDIFICI IN MURATURA

Guido Magenes, Serena Cattari



DIPARTIMENTO
INGEGNERIA
CIVILE
ARCHITETTURA



Università
di Genova

DICCA DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA
E AMBIENTALE