

UNA PROCEDURA DI TIPO PRESTAZIONALE PER IL RINFORZO DI STRUTTURE ESISTENTI IN MURATURA ORDINARIA

Di Lauro G.

Dipartimento di Ingegneria Civile, Seconda Università di Napoli, Via Roma 29 – 81031 – Aversa (CE)

DOTTORATO DI RICERCA IN “CONSOLIDAMENTO E ADEGUAMENTO STRUTTURALE”

Gli edifici in muratura ordinaria (URM-Unreinforced Masonry Buildings) hanno evidenziato in occasione di eventi sismici anche recenti, modeste prestazioni sismiche ed estrema vulnerabilità alle azioni orizzontali. I fattori che determinano tale debolezza sono di natura diversa: scarsa rispondenza ad una progettazione sismoresistente; scarsa resistenza a trazione del materiale già a bassi livelli deformativi; degrado dei materiali costituenti la muratura; comportamento fortemente non lineare. Tuttavia solo il comportamento inelastico del materiale può spiegare la sopravvivenza di manufatti murari ad eventi sismici anche di particolare intensità. In tale ottica per valutare le prestazioni di edifici in muratura diventa fondamentale la scelta del metodo di analisi e dei criteri di verifica. I metodi dell'analisi statica lineare e della dinamica modale risultano particolarmente inadatti a descrivere il comportamento effettivo di queste strutture a causa della non linearità che il materiale evidenzia già a bassi livelli tensionali. L'analisi limite inoltre, trascurando la deformabilità della struttura, rappresenta un valido strumento solo per la determinazione del carico di collasso e la verifica allo stato limite ultimo. D'altra parte l'analisi dinamica in campo non lineare nonostante rappresenti lo strumento più potente per valutare la risposta inelastica delle strutture, richiede elevate potenzialità di calcolo e parametri di ingresso come segnali accelerometrici spettro-compatibili, modelli isteretici del materiale, che condizionano poi fortemente i risultati finali. Le procedure statiche non lineari basate sull'analisi di spinta quindi, costituiscono lo strumento più affidabile e robusto e trovano ampio spazio nei più recenti codici normativi. Alcune analisi numeriche in campo non lineare col metodo agli elementi finiti, sono state condotte su un edificio in scala 1:3 in muratura di mattoni pieni con tessitura regolare il cui comportamento sismico è stato studiato su tavola vibrante presso il laboratorio dell'Università di Skopje. L'edificio presenta in pianta una doppia simmetria ed è composto da 4 piani con impalcati costituiti da solette piene in calcestruzzo. Il modello FEM con elementi brick ad otto nodi implementato nel codice di calcolo DIANA, è stato costruito ipotizzando la muratura come materiale omogeneo ed isotropo. La calibrazione del modello FEM in campo elastico con la scelta dei moduli di elasticità della muratura e del calcestruzzo è stata eseguita minimizzando una specifica funzione di errore definita sulle frequenze naturali, sulle forme modali e sulle spinte sismiche. Il comportamento anelastico della muratura è stato descritto nell'ottica della fessurazione diffusa utilizzando il dominio di rottura di Rankine-Von Mises. Le analisi di spinta sono state condotte utilizzando una procedura che permette di portare in conto il progredire delle plasticizzazioni, modificando la distribuzione iniziale delle forze (rettangolare o affine al primo modo) in funzione della deformata laterale che la struttura evidenziava durante l'analisi. Le analisi di pushover sono state eseguite nella configurazione esistente e nell'ipotesi di rinforzo del piano terra mediante lamine in FRP (Fiber Reinforced Polymer) disposte nelle due configurazioni orizzontale e diagonale. Dalle curve di pushover ottenute infine, utilizzando il Metodo dello Spettro di Capacità e degli Spettri Inelastici, è stato possibile valutare l'incremento prestazionale tra la configurazione esistente e quella rinforzata con lamine in FRP.

(Recapito telefonico: +39 328 33 59 453)

UNA PROCEDURA DI TIPO PRESTAZIONALE PER IL RINFORZO DI STRUTTURE ESISTENTI IN MURATURA ORDINARIA

Gennaro DI LAURO

Dipartimento di Ingegneria Civile, Seconda Università degli Studi di Napoli, Via Roma, 9 – 81031 Aversa (CE)
DOTTORATO DI RICERCA IN "CONSOLIDAMENTO E ADEGUAMENTO STRUTTURALE"



DR-II-013

1. INTRODUZIONE

Gli edifici in muratura ordinaria (URM - Unreinforced Masonry Buildings) hanno evidenziato in occasione di eventi sismici anche recenti, modeste prestazioni sismiche ed estrema vulnerabilità alle azioni orizzontali. I fattori che determinano tale debolezza sono di natura diversa: scarsa rispondenza ad una progettazione sismoresistente; scarsa resistenza a trazione del materiale già a bassi livelli deformativi; degrado dei materiali costituenti la muratura; comportamento meccanico fortemente non lineare. Tuttavia solo il comportamento inelastico del materiale può spiegare la sopravvivenza, seppur con gravi danni, di tali manufatti anche ad eventi sismici di particolare intensità.

Per valutare le prestazioni sismiche di edifici in muratura diventa fondamentale la scelta del metodo di analisi e dei criteri di verifica.

Il lavoro propone una procedura per la valutazione delle prestazioni sismiche di strutture esistenti in muratura, anche in presenza di interventi di rinforzo in FRP, mediante procedure statiche non lineari basate sull'analisi di spinta.

2. PROTEZIONE DI STRUTTURE MURARIE MEDIANTE TECNICHE MISTE REVERSIBILI

Gli interventi reversibili sono di solito basati su tecniche miste realizzate con materiali diversi rispetto a quelli impiegati nel corso della prima edificazione dell'opera. Tali tecniche hanno subito negli ultimi anni un notevole sviluppo grazie dalla disponibilità sempre maggiore di nuovi materiali:

- ▶ **materiali metallici speciali** (p.e. gli acciai inossidabili, le leghe di alluminio, le leghe di titanio);
- ▶ **materiali plastici di tipo composito** (pultrusi o fibrorinforzati);
- ▶ **leghe metalliche con memoria di forma** (Shape Memory Alloys).

In particolare, una strategia innovativa di rinforzo sviluppata negli ultimi anni consiste nell'impiego dei materiali compositi fibrorinforzati costituiti da fibre ad alta resistenza (vetro, aramide, carbone) e da una matrice polimerica. L'applicazione esterna di elementi in **FRP** (lamine, tessuti) per il rinforzo degli edifici infatti, presenta numerosi vantaggi: rapporto peso/resistenza molto basso; rapidità di posa in opera; modesta invasività.

3. APPROCCIO DI TIPO PRESTAZIONALE PER IL RINFORZO DI STRUTTURE MURARIE

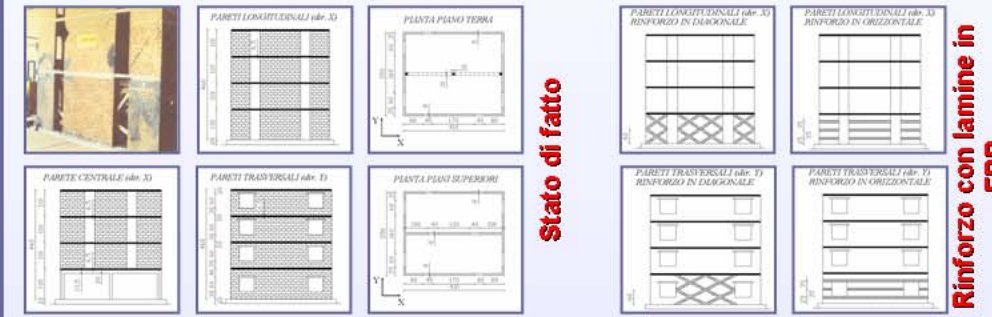
Adeguare gli edifici esistenti ai requisiti di progetto di codici sismici avanzati risulta economicamente proibitivo. Gli obiettivi della riabilitazione strutturale quindi, dovrebbero dipendere da criteri prestazionali specifici, confrontando la domanda sismica con la capacità strutturale in modo da assicurare un livello di danno predefinito e prevenire il collasso sotto un prefissato livello dell'intensità dell'azione sismica.

I moderni codici normativi definiscono sulla base di specifici criteri, diversi livelli prestazionali: **completa operatività - FO**; **operatività - O**; **salvaguardia delle vite umane - LS**; **prevenzione al collasso - CP**. Tali livelli vengono poi correlati ai livelli d'intensità dell'azione sismica ossia ai livelli di rischio: **frequente, occasionale, raro, molto raro**.

L'applicazione del Performance-Based Seismic Engineering (PBSE) richiede l'analisi non lineare della struttura. Le **procedure statiche non lineari** basate sull'analisi di spinta costituiscono uno strumento di analisi robusto ed affidabile e trovano spazio nelle normative sismiche più evolute.

4. PERFORMANCE-BASED ASSESSMENT: CASO DI STUDIO

L'edificio oggetto di studio corrisponde ad una tipologia costruttiva ricorrente nell'edilizia dell'Italia centrale. La tessitura muraria, di tipo regolare è costituita da mattoni pieni intervallati con letti di malta orizzontali. Gli impalcati sono costituiti da solette piene in calcestruzzo. Per tale edificio sono disponibili in letteratura prove dinamiche eseguite con tavola vibrante su un modello fisico ridotto in scala 1:3.



5. CALIBRAZIONE DEL MODELLO FEM

Il **modello FEM** con elementi brick ad 8 nodi implementato nel codice di calcolo DIANA, è stato costruito ipotizzando la muratura come **materiale omogeneo ed isotropo**. La calibrazione del modello in campo elastico è stata eseguita minimizzando una specifica funzione di errore definita sulle frequenze naturali, sulle forme modali e sulle spinte sismiche. I parametri di controllo di tale funzione sono: il modulo di elasticità della muratura e il modulo di elasticità del calcestruzzo.



6. MODELLAZIONE DEL MATERIALE

Le analisi statiche non lineari sono state condotte ipotizzando il comportamento anelastico della muratura nell'ottica della **fessurazione diffusa** utilizzando il dominio di **Rankine-Von Mises** caratterizzato dall'intersezione tra una condizione di plasticità ed una di rottura. Il CLS delle solette di piano e le lamine in FRP invece presentano un comportamento di tipo elastico lineare.

Per la modellazione della **fessurazione**, il modello impiegato permette di definire anche un **legame di softening** con **tension cut-off**.

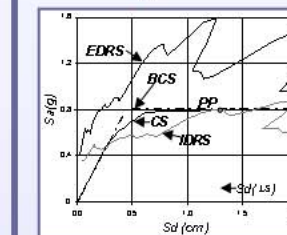
$f_1(\sigma, k_1) = \sqrt{\frac{1}{2} \sigma^T P_1 \sigma + \frac{1}{2} \sigma^T \bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_1(k_1)}$
 $f_2(\sigma, k_2) = \sqrt{\frac{1}{2} \sigma^T P_2 \sigma - \bar{\sigma}_2(k_2)}$
 $f_3(\sigma, k_3) = \sigma^T \bar{\sigma}_3 - \bar{\sigma}_3(k_3)$

PROPRIETA' ELASTICHE DELLA MURATURA		PROPRIETA' MECCANICHE FRP	
Peso specifico	0.18 10 ⁴ N/mm ³	Sp. equivalente	0.346 mm
Modulo di elasticità	1140 N/mm ²	Larghezza	20 cm
Coefficiente di Poisson	0.18	Modulo E a trazione	230 GPa
PROPRIETA' INELASTICHE DELLA MURATURA		Allungamento a rottura	1.5 %
Resistenza a trazione	0.23 N/mm ²	PROPRIETA' MECCANICHE CLS	
Resistenza a compressione	5.00 N/mm ²	Peso specifico	2.5 ton/m ³
Energia di frattura a trazione	0.02 N/mm	Modulo di elasticità	16.4 GPa
Fattore b	0.2	Coefficiente di Poisson	0.18

7. METODO DELLO SPETTRO DI CAPACITA' E DEGLI SPETTRI INELASTICI IN PRESENZA DI PUSHOVER ADATTIVO

La risposta inelastica della struttura è stata valutata attraverso una procedura basata sull'analisi di pushover e sul metodo dello spettro di capacità e degli spettri inelastici. La distribuzione delle spinte viene modificata nel corso dell'analisi di pushover per portare in conto l'effetto delle plasticizzazioni.

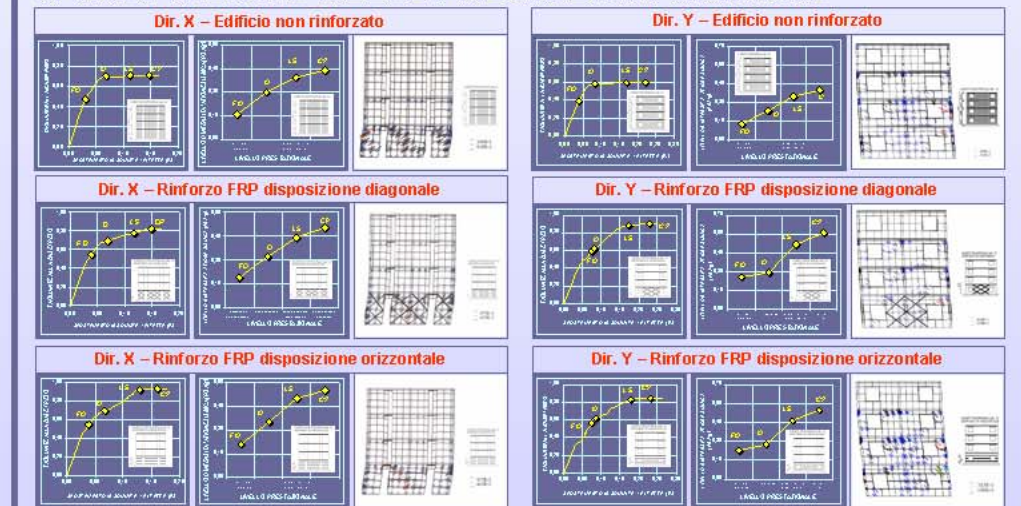
$$M_{eq}^* = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \delta_i^2}{\sum_{i=1}^N m_i \delta_i^{*2}}; \quad K_{eq}^* = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \delta_i^2}{\sum_{i=1}^N m_i \delta_i^{*2}} \sum_{i=1}^N F_i \delta_i^2; \quad \Delta S_2^* = \Delta V^* \frac{\sum_{i=1}^N m_i \delta_i^{*2}}{\left(\sum_{i=1}^N m_i \delta_i^2\right)^2}; \quad \Delta S_3^* = \Delta S_2^* \frac{\sum_{i=1}^N m_i \delta_i^{*3}}{\sum_{i=1}^N F_i \delta_i^2}$$



Le prestazioni sismiche dell'edificio nello stato esistente e rinforzato con lamine in FRP, sono state valutate con riferimento ai limiti prestazionali previsti dalle FEMA-356. Il confronto è stato eseguito in termini di **Curve di Performance** e **Matrici di Performance**.

Le analisi sono state condotte considerando tre segnali accelerometrici spettro-compatibili con lo spettro elastico dell'**EC8** per terreno di tipo A.

8. VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI SISMICHE



9. CONCLUSIONI

Nel lavoro è stata effettuata la valutazione prestazionale di edifici in muratura in presenza di interventi di miglioramento sismico. A tale scopo, è stata in primo luogo effettuata una calibrazione del modello FEM attraverso la minimizzazione di una specifica funzione d'errore sulle frequenze, sui modi di vibrare e sulle spinte modali. È stata quindi applicata una procedura incrementale ma non iterativa che consente di correlare i livelli prestazionali con i livelli di intensità dell'azione sismica. Tale procedura - basata sul pushover adattivo e sul Metodo degli Spettri di Capacità e degli Spettri Inelastici - ha consentito di effettuare un confronto prestazionale tra diverse configurazioni degli interventi di rinforzo con FRP. L'incremento dei moltiplicatori per i diversi livelli prestazionali considerati sono di seguito riportati:

	FO	O	LS	CP		FO	O	LS	CP
X-rinf. diag.	19%	7%	11%	14%	Y-rinf. diag.	108%	26%	48%	53%
X-rinf. orizz.	42%	6%	18%	25%	Y-rinf. orizz.	68%	49%	43%	38%

In riferimento al moltiplicatore di collasso l'incremento massimo risulta del **53%** nel caso di rinforzo diagonale e sisma in direzione Y mentre quello minimo del **14%** nel caso di rinforzo diagonale e sisma in direzione X.