



**POLITECNICO DI BARI**  
**FACOLTA' DI INGEGNERIA DI TARANTO**  
**INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL**  
**TERRITORIO**

*Anno Accademico*

*2005 / 2006*

*tesi di laurea in*

**SCIENZA DELLE COSTRUZIONI**

**ANALISI DEGLI EDIFICI IN MURATURA**  
**SOTTOPOSTI AD AZIONE SISMICA**

Relatore:

*Prof. Ing. Francesco TRENTADUE*

Laureando:

*Giuseppe SANTORO*

*Alla mia famiglia*

# ANALISI DEGLI EDIFICI IN MURATURA SOTTOPOSTI AD AZIONE SISMICA

## INDICE ARGOMENTI

### CAPITOLO 1

#### CARATTERISTICHE GENERALI DEGLI EDIFICI IN MURATURA

1.1 Introduzione .....	pag. 1
1.2 Comportamento sismico degli edifici in muratura .....	pag. 3
1.3 Meccanismi di danno negli edifici in muratura .....	pag. 6
1.4 Resistenza dei maschi murari .....	pag. 11
1.5 Deformabilità dei maschi murari .....	pag. 18
1.6 Comportamento delle fasce murarie soggette ad azione sismica .....	pag. 19

### CAPITOLO 2

#### NUOVA NORMATIVA SISMICA PER GLI EDIFICI IN MURATURA

2.1 Premessa .....	pag. 21
2.2 Materiali .....	pag. 21
2.3 Modalità costruttive e fattori di struttura .....	pag. 23
2.4 Criteri di progetto e requisiti geometrici .....	pag. 24
2.5 Definizione dell'azione sismica .....	pag. 25
2.6 Metodi di analisi .....	pag. 26
2.6.1 Analisi statica lineare .....	pag. 26
2.6.2 Analisi statica non lineare .....	pag. 29
2.6.3 Analisi dinamica modale .....	pag. 32
2.6.4 Analisi dinamica non lineare .....	pag. 33

## CAPITOLO 3

### CALCOLO DELL'AZIONE SISMICA SUGLI EDIFICI

3.1 Principi di dinamica delle strutture .....	pag. 35
3.2 Risposta sismica e spettro di risposta elastica .....	pag. 37
3.2.1 Spettri di risposta elastica della normativa italiana .....	pag. 39
3.3 Combinazione della risposta sismica con le altre azioni .....	pag. 43

## CAPITOLO 4

### MODELLAZIONE DEGLI EDIFICI IN MURATURA

4.1 Considerazioni generali .....	pag. 45
4.1.2 Principali regole costruttive .....	pag. 46
4.2 Schematizzazioni strutturali del modello di analisi .....	pag. 47
4.2.1 Considerazioni sul comportamento elastoplastico della muratura .....	pag. 52

## CAPITOLO 5

### STUDIO DI MODELLAZIONE DI UN EDIFICIO IN MURATURA

5.1 Considerazioni generali .....	pag. 55
5.1.2 Caratteristiche del materiale murario .....	pag. 58
5.2 Costruzione del modello a telaio equivalente .....	pag. 59
5.3 Calcolo dei carichi e delle azioni sismiche .....	pag. 63

## CAPITOLO 6

### VERIFICHE DI SICUREZZA

6.1 Criteri di verifica .....	pag. 68
6.1.2 Verifiche allo SLU per collasso a pressoflessione nel piano pareti .....	pag. 70
6.1.3 Verifica allo SLU per collasso a taglio nel piano delle pareti .....	pag. 73
6.1.4 Verifiche di sicurezza allo SLU per le travi in muratura .....	pag. 74
6.1.5 Verifica allo SLU per collasso a pressoflessione fuori piano .....	pag. 76
6.2 Risultati delle verifiche a pressoflessione nel piano della parete ed a taglio ..	pag. 79
6.2.1 Verifiche di resistenza sulle fasce .....	pag. 85
6.2.2 Verifiche per azioni ortogonali al piano dei muri .....	pag. 89

CAPITOLO 7

MURATURA ARMATA

7.1 Introduzione .....	pag. 91
7.2 Criteri costruttivi .....	pag. 92
7.2.1 Disposizione dell'armatura .....	pag. 94

CAPITOLO 8

ANALISI STATICA NON LINEARE

8.1 Caratteristiche generali .....	pag. 99
8.1.2 Procedura di calcolo .....	pag. 100
8.1.3 Sistema bilineare equivalente .....	pag. 102
8.1.4 Risposta del sistema bilineare equivalente .....	pag. 105
8.1.5 Spostamenti della struttura .....	pag. 105
8.2 Comportamento dei sistemi elastoplastici .....	pag. 106
8.2.1 Spettri di progetto .....	pag. 107
8.3 Introduzione al modello di calcolo "3Muri" .....	pag. 109
8.3.1 Analisi pushover del modello "3Muri" .....	pag. 112

CAPITOLO 9

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....	pag. 115
---------------------------------	----------

## **Prefazione**

*La presente tesi di ricerca si prefigge lo scopo di fornire un quadro di conoscenza essenziale sulle costruzioni in muratura soggette ad azioni sismiche, nonché di individuare un metodo di calcolo semplice ed efficiente per le stesse.*

*Il costruito in muratura è stato di recente rivalutato, grazie all'affinamento delle tecniche costruttive nel settore, all'impiego di nuovi materiali ed all'avvento, in quest'ultimo decennio, dei calcolatori elettronici come sussidio al calcolo strutturale.*

*Il seguente lavoro si fonda sull'utilizzo di un software di calcolo – il Sap 2000 –, considerato uno dei programmi migliori nel campo della scienza delle costruzioni per la sua flessibilità di applicazione ai più disparati casi reali.*

*Nel presente lavoro sono stati considerati i molteplici miglioramenti strutturali adottati dall'utilizzo del materiale laterizio nel costruito recente, adoperato in sostituzione ai tufi od alle pietre che hanno caratterizzato le costruzioni murarie del passato: mentre per quest'ultime, in caso di sisma, non risulta possibile predeterminarne il grado di resistenza, poiché essenzialmente composte da un materiale anisotropo (pietre di varie dimensioni e malta), per le nuove costruzioni murarie risulta possibile prevedere, con esigui margini di incertezza, il loro comportamento in presenza di specifiche azioni sismiche, trattandosi di edifici costituiti essenzialmente da blocchi uniformi in laterizio e malta, opportunamente disposti.*

*Il seguente studio è stato facilitato dalle esperienze acquisite in questi ultimi decenni sul comportamento delle costruzioni murarie soggette ad azioni sismiche, dalle quali è stato possibile editare nuovi accorgimenti strutturali volti a migliorare le caratteristiche resistenziali di ciascun elemento strutturale; molte di queste osservazioni risalgono a esperienze dirette desunte dal comportamento reale di tali strutture in concomitanza al verificarsi di fenomeni sismici sul territorio nazionale, altre osservazioni sono state dedotte da sperimentazioni condotte in laboratorio.*

*Il grado di conoscenza attualmente disponibile sulle costruzioni murarie in zona sismica, benché fondato prevalentemente su considerazioni euristiche, consente di realizzare strutture altrettanto valide come quelle in cemento armato, nonostante si renda ancora necessario approfondire determinati aspetti relativi soprattutto alla dinamica strutturale.*

*La situazione italiana a riguardo di tale materia risulta abbastanza complessa, data la confusione normativa generata in questi ultimi anni, dal susseguirsi di varie norme e successive modifiche; tale situazione è da imputarsi alla necessità di adeguamento immediato ai moderni principi costruttivi dettati dagli eurocodici, essendo stata, quella italiana, una normativa in questo settore spesso indebitamente trascurata.*

*Per questo motivo, tra gli obiettivi prefissi in tale lavoro, esiste quello di proporre uno strumento di riferimento valido anche nell'ambito professionale, ambendo a chiarire gli aspetti progettuali più controversi della normativa italiana.*

*Quanto all'esito del lavoro svolto, è possibile affermare che il metodo di calcolo proposto nel presente lavoro, rispettando i principali accorgimenti costruttivi derivanti dalle esperienze condotte in tale settore, può essere considerato un valido strumento per lo studio del comportamento strutturale degli edifici murari in zona sismica.*

*Si osserva inoltre che la recente tecnica costruttiva ed i nuovi materiali impiegati consentono di rientrare con maggiore facilità nei limiti imposti dalla legge, essendo le strutture dotate di una maggiore resistenza agli effetti sismici e potendo, laddove questa risulti insufficiente, incrementarla agevolmente, mediante, ad esempio, l'inserzione di una esigua quantità di armatura.*

*La presente tesi, sviluppata in vari mesi di studio, mi ha consentito di ampliare il personale quadro di conoscenza sulle strutture in zona sismica, estendendo le cognizioni al materiale murario, del quale se ne trascura spesso la trattazione nei corsi di studio ordinari.*

*Rivolgo un ringraziamento particolare al mio Relatore, prof. Francesco Trentadue, per la Sua infinita disponibilità e per la Sua attiva partecipazione alla redazione del presente elaborato.*

*Infine, costituendo la presente tesi un'espressione conclusiva dell'operato personale svolto nell'intero corso di studio, durante il quale il supporto familiare è risultato determinante per il raggiungimento del traguardo laurea, non posso esimermi dal rivolgere uno speciale ringraziamento alla mia famiglia, alla quale dedico questo lavoro.*

*Giuseppe Santoro*

*Taranto, novembre 2006*

(omissis)

## **CAPITOLO 4**

### **MODELLAZIONE DEGLI EDIFICI IN MURATURA**

#### ***4.1 Considerazioni generali***

Secondo il punto 4.4 dell'O.P.C.M. 3431 "il modello della struttura sul quale dovrà essere effettuata l'analisi dovrà rappresentare in modo adeguato la distribuzione di massa e rigidezza effettiva", considerando, quando necessario, "il contributo degli elementi non strutturali".

Per un edificio in muratura quest'ultimo aspetto risulta di fondamentale importanza in quanto, anche gli elementi non propriamente strutturali (tramezzi e fasce murarie d'interpiano) possono contribuire in maniera considerevole al comportamento complessivo della struttura.

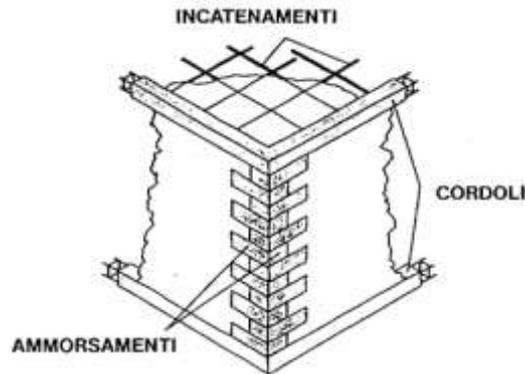
La tecnica costruttiva recente per le costruzioni in muratura prevede che l'edificio sia concepito come una struttura tridimensionale costituita da singoli elementi opportunamente collegati tra loro ed alle fondazioni, in modo tale da resistere efficacemente alle azioni verticali ed orizzontali.

Gli elementi principali che costituiscono la struttura portante possono essere considerati i seguenti:

- muri sollecitati prevalentemente da azioni orizzontali (fasce);
- muri sollecitati prevalentemente da azioni verticali (maschi murari);
- solai piani.

Tali elementi devono essere opportunamente collegati tra loro; in particolare, il D.M. 20/11/87 dispone che tutti i muri siano collegati con i solai mediante cordoli in c.a. al livello degli stessi e che ciascun muro sia efficacemente ammorsato con il suo attiguo, lungo le intersezioni verticali.

Inoltre, al fine di garantire ulteriormente la stabilità della struttura, si prevede il



**Figura 4.1** Schematizzazione dei principali vincoli di connessione tra gli elementi strutturali.

possibile incatenamento al livello di impalcato dei muri, in direzione ortogonale alla tessitura dei solai, in quanto, lungo la direzione di orditura l'ancoraggio è assicurato dalle travi degli stessi solai.

Al fine di facilitare la comprensione di quanto sinteticamente esposto, nel paragrafo seguente si riportano alcuni dettagli costruttivi riguardanti i principali elementi strutturali che compongono gli edifici in muratura, sulla base delle regole prescritte dalle normative vigenti.

#### ***4.1.2 Principali regole costruttive***

Il collegamento tra la fondazione e la struttura in elevazione sarà di norma realizzato mediante un cordolo in c.a. disposto alla base di tutte le murature verticali resistenti, di spessore pari a quello della muratura di fondazione e di altezza non inferiore alla metà di detto spessore.

I cordoli in c.a. realizzati in corrispondenza dei solai di piano e di copertura dovranno avere una larghezza almeno pari a quella della muratura sottostante ed un'altezza non inferiore ai 15 cm. Detti cordoli dovranno essere armati mediante quattro barre longitudinali in acciaio aventi diametro minimo di 16 mm e le staffe

saranno disposte con passo non superiore a 25 cm e caratterizzate da un diametro minimo di 6 mm.

I travetti prefabbricati dei solai devono essere prolungati nel cordolo per una lunghezza non inferiore alla metà della larghezza del cordolo stesso.

In corrispondenza degli incroci d'angolo dei muri portanti perimetrali sono prescritte, su entrambi i lati, zone di muratura di lunghezza pari ad almeno 1 m (lunghezze comprensive dello spessore del muro ortogonale).

Lo spessore minimo della muratura deve essere di almeno 24 cm, al netto dell'intonaco.

Le aperture praticate nei muri portanti devono essere verticalmente allineate, al fine di mantenere costante l'area resistente lungo l'intera altezza dell'edificio.

Le strutture costituenti i vari orizzontamenti, comprese le coperture, non devono essere spingenti ed eventuali spinte orizzontali, come quelle ad esempio esercitate da archi e volte, dovranno essere opportunamente equilibrate mediante l'inserzione di tiranti o cerchiature.

Infine, rimandando alle normative vigenti per gli ulteriori dettagli prescrittivi che in questa sede possono ritenersi trascurabili, si richiama la regola generale da perseguire per la realizzazione delle costruzioni in muratura in zona sismica, consistente nell'adoperare piante che siano il più possibile regolari e simmetriche rispetto ai due assi ortogonali della struttura, al fine di garantire compattezza ed un comportamento "scatolare" dell'edificio che si rivela essere a vantaggio di stabilità.

#### ***4.2 Schematizzazioni strutturali del modello di analisi***

Per una parete muraria multipiano dotata di aperture regolari e caricata nel piano, sottoposta a carichi verticali costanti ed a forze orizzontali crescenti applicate al livello dei solai, secondo una distribuzione assegnata, le osservazioni sperimentali sui meccanismi di danno reali indotti dalle sollecitazioni sismiche, hanno suggerito l'elaborazione di un sistema ideale, che consente di rappresentare l'intera struttura mediante l'utilizzo di un telaio equivalente.

Il telaio equivalente si compone di elementi del tipo "beam-column", ovvero schematizzabili mediante il loro asse principale orizzontale o verticale e deformabili assialmente ed a taglio.

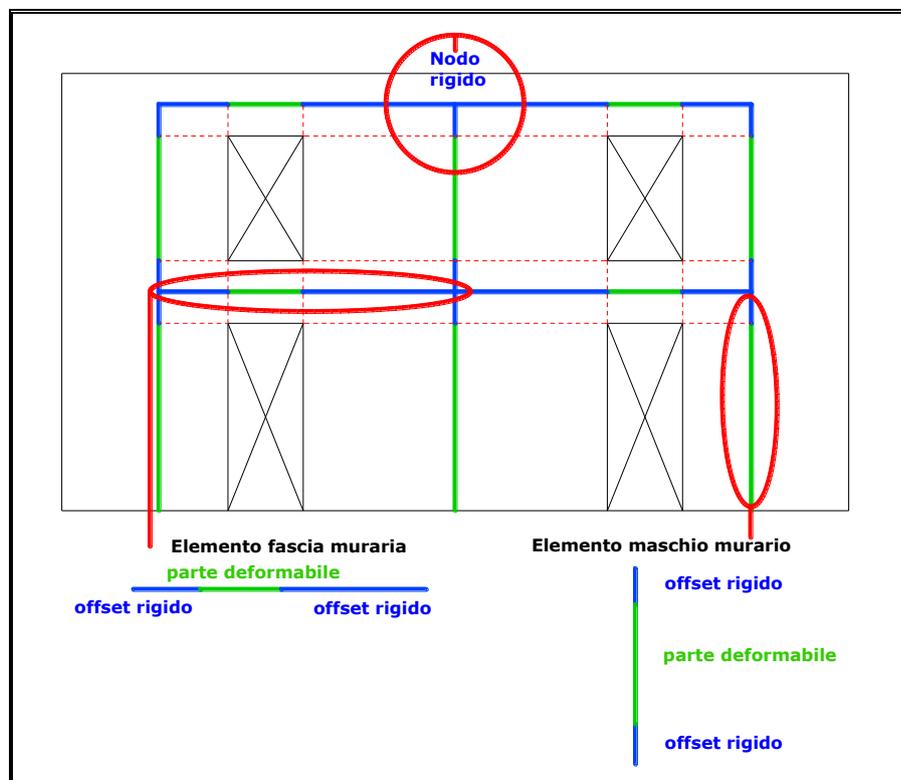
Gli elementi principali del sistema sono quelli cui attendono le principali caratteristiche strutturali dello stesso; quest'ultime sono convenzionalmente attribuite ai maschi murari ed alle fasce di interpiano. Per maschi murari s'intendono gli elementi verticali della struttura, identificabili realmente come pareti portanti delle facciate, nonché di eventuali muri portanti interni dell'edificio, i quali sono sottoposti principalmente a carichi verticali. Per fasce s'intendono invece le porzioni di muratura ed i corrispondenti cordoli che intercorrono, in corrispondenza dei solai, tra le aperture appartenenti a due piani diversi ma contigui; tali zone assolvono principalmente al compito di resistere alle azioni orizzontali e garantiscono la necessaria connessione tra i maschi murari delle diverse facciate.

In tal modo il comportamento di ciascuna parete viene assimilato a quello di un insieme di pannelli (maschi e fasce) opportunamente connessi tra loro.

In una modellazione siffatta i nodi tra i maschi e le fasce sono rappresentati da parti di muratura di dimensione finita, assunte indeformabili. Tale esemplificazione consente di rappresentare, con buona approssimazione, il

comportamento reale degli edifici in muratura sottoposti ad azione sismica. Infatti, le osservazioni dei danni indotti su questi ultimi, hanno consentito di pervenire alla conclusione che le zone di connessione comprese tra maschi e fasce murarie, corrispondenti alle porzioni di parete non allineate con le aperture, sono quelle che subiscono il minore grado di danneggiamento. Tale considerazione consente di idealizzare l'estensione del nodo rigido verso i maschi e le fasce per l'intera lunghezza dei tratti in corrispondenza dei quali la parete muraria risulta priva di aperture.

La rappresentazione nel modello a telaio equivalente dei nodi rigidi, nei programmi di calcolo automatico, è effettuata mediante l'inserzione di "offset rigidi" sugli elementi strutturali fascia e maschio, cioè di parti infinitamente rigide, parzialmente estese lungo il pannello murario.



**Figura 4.2** Modellazione tipo di una parete in muratura portante.

In maniera analoga gli elementi fascia e maschio sono caratterizzati da una porzione deformabile, denominata “lunghezza od altezza efficace”, corrispondente alle zone di apertura in prossimità delle quali si registrano i danni maggiori nella struttura.

I solai che assolvono alla principale funzione di ridistribuire le forze d'inerzia indotte da un sisma tra i vari elementi verticali, in maniera proporzionale alla loro rigidità, possono essere schematizzati come diaframmi nell'ipotesi che la loro rigidità nel piano sia sufficientemente elevata. A tal fine la normativa impone che quest'ultimo aspetto sia opportunamente verificato, poiché il sottovalutare in fase di progetto possibili deformazioni anelastiche del solaio nel proprio piano può indurre risultati nel sistema notevolmente differenti da quelli attesi.

Nel caso di diaframmi infinitamente rigidi si riduce il grado di libertà cinematica al livello dei piani; ciò consente di adottare ipotesi semplificative nella modellazione strutturale, quali il considerare tre soli gradi di libertà per ciascun piano ed il supporre ciascuna massa concentrata nel proprio baricentro.

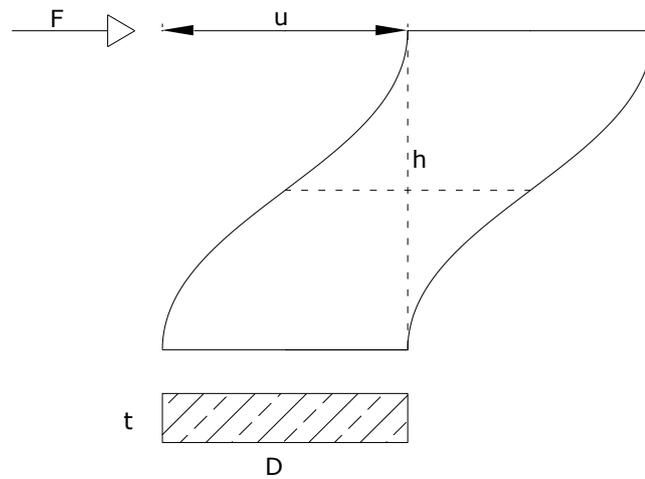
Le rigidità degli elementi murari, nel caso di vincolo a doppio incastro alle estremità possono essere calcolate considerando sia il contributo flessionale che quello tagliante, agenti sulla parete.

La rigidità di una parete, considerando l'effetto flettente e tagliante sulla deformazione (figura 4.3), nell'ipotesi di doppio incastro in testa ed al piede dell'elemento, è esprimibile secondo la seguente relazione:

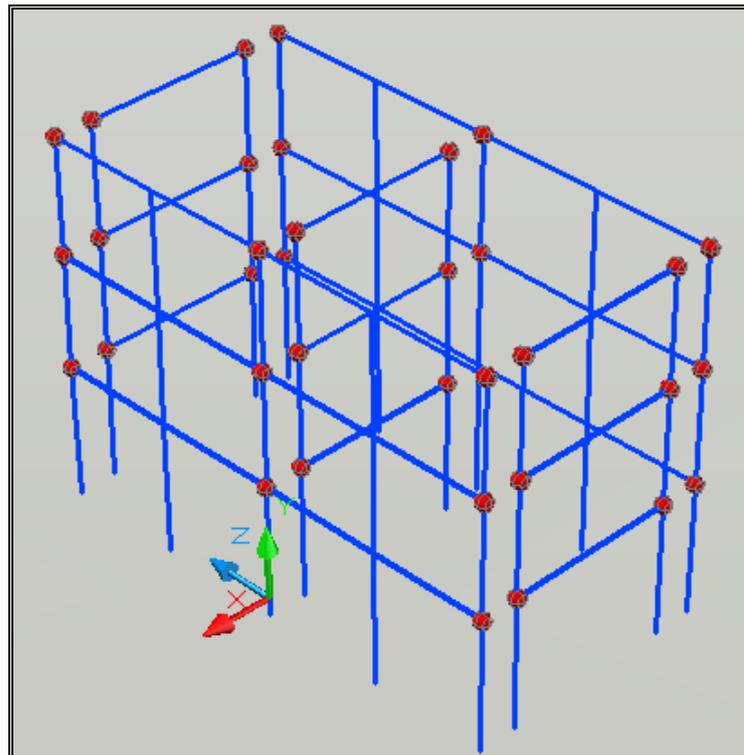
$$K = \frac{1}{\frac{h^3}{12EJ} + \frac{\chi h}{GA}}$$

essendo:

- $h$  l'altezza della parete;
- $\chi$  il fattore di forma (per taglio su parete rettangolare è pari a  $6/5 = 1.2$ );
- $E$  il modulo elastico normale;
- $G$  il modulo elastico tagliante (assumibile pari a  $0.4E$  per murature nuove);
- $A$  area della sezione;
- $J$  momento d'inerzia (per parete rettangolare pari a  $1/12 Dt^3$ ).



**Figura 4.3** Schema della deformata di parete con traversi rigidi a flessione.



**Figura 4.4** Esempio di modellazione 3D, con evidenziazione dei nodi di elementi ortogonali convergenti, soggetti a vincolo di corpo rigido.

Se le intersezioni verticali tra i vari maschi murari sono caratterizzate da un buon grado di ammorsamento, nella modellazione strutturale è possibile imporre la congruenza fra gli spostamenti dei nodi appartenenti ai maschi al livello dei solai, ulteriormente garantita dalla presenza dei cordoli in c.a. Tale condizione può essere rispettata introducendo nel modello di calcolo un vincolo a “corpo rigido” tra i nodi dei vari maschi murari che convergono negli ammorsamenti, al livello dei solai; in questo modo i nodi interessati avranno la stessa traslazione in qualunque direzione, potendo essere pensati come punti appartenenti ad uno stesso elemento rigido.

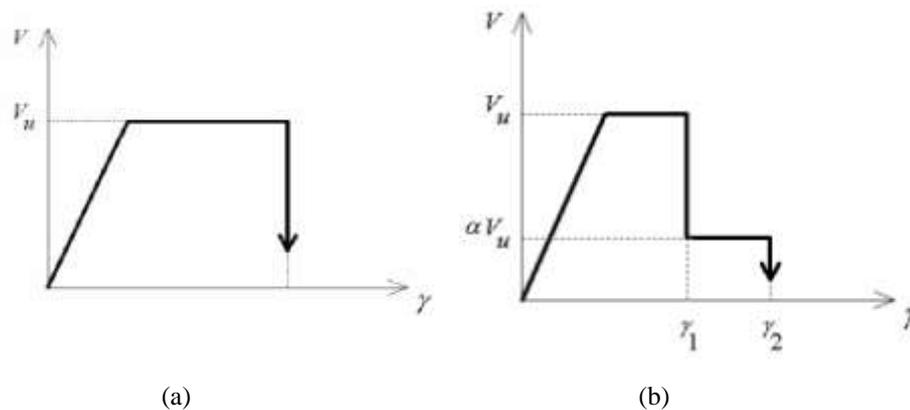
#### ***4.2.1 Considerazioni sul comportamento elastoplastico della muratura***

Il reale comportamento dell'elemento maschio o fascia muraria è del tipo elastoplastico; ciò implica che il materiale possa considerarsi avere una fase iniziale nella quale l'entità delle sollecitazioni sono proporzionali a quelle delle deformazioni, superata la quale l'elemento, per effetto dell'aumento delle sollecitazioni, subisce deformazioni permanenti in campo plastico sino a giungere a rottura. I meccanismi di rottura possibili per la muratura sono quelli già menzionati nel capitolo 1 e di seguito ribaditi:

- per taglio;
- per scorrimento;
- per flessione - ribaltamento (rocking).

Nella modellazione di Magenes e Calvi, per tener conto della duttilità del materiale, gli elementi portanti sono schematizzati come entità deformabili aventi un comportamento elastico sino a quando non si verifica uno dei possibili

meccanismi di rottura sopra citato. Si evidenzia come in realtà i maschi murari possano essere soggetti a tutti e tre i meccanismi di rottura mentre, per le fasce, si verificano i soli meccanismi di rottura dovuti a pressoflessione o a taglio. In particolare, per quest'ultime risulta a vantaggio di sicurezza ipotizzare una fase plastico-fragile, come illustrato ad esempio nella figura seguente (b), che propone il modello di rottura adottato nel metodo "SAM" di Magenes e Calvi, nel quale si assume che, superato in fase plastica un valore di deformazione angolare prestabilito, esista un degrado della resistenza.



**Figura 4.5** (a) Schematizzazione del comportamento elasto-plastico di un maschio murario nel caso di rottura per taglio; (b) comportamento elasto-plastico-fragile di un elemento fascia sottoposto a sforzo di taglio, secondo il metodo "SAM" di Magenes e Calvi.

La rottura per pressoflessione avviene quando in una sezione generica dell'elemento si raggiunge il valore del momento ultimo, definito nei paragrafi successivi.

La rottura per taglio è imputabile al raggiungimento in una sezione dell'elemento del valore ultimo di taglio, definito anch'esso in seguito.

La rottura per taglio-scorrimento si assume che avvenga lungo un letto di malta in corrispondenza di una delle sezioni estreme deformabili dell'elemento.

Un'analisi pushover consentirebbe di cogliere in maniera realistica il comportamento della muratura, considerando il riadattamento e la redistribuzione

delle sollecitazioni nella fase plastica, nella quale si è potuto constatare che esiste ancora una considerevole resistenza della struttura, come già esposto al capitolo 2, par. 6.1.2.

L'analisi lineare del modello risulta invece limitata a cogliere le caratteristiche di sollecitazione del materiale nella sua prima fase di adattamento ai carichi, con la probabilità di ottenere risultati non del tutto rappresentativi la resistenza del materiale. Proprio per tener conto di quest'ultimo aspetto, la normativa prevede che lo spettro di progetto sia ricavato mediante l'utilizzo del fattore di struttura "q" (definito nei paragrafi precedenti), il quale consente di ridurre i valori di accelerazione dello spettro, al fine di ottenere valori di sollecitazione comparabili con quelli derivanti dalle analisi pushover. Con tale semplificazione i risultati ottenuti possono, almeno per gli edifici più regolari, risultare molto prossimi a quelli reali.

(omissis)

**VIETATA LA COPIA E LA RIPRODUZIONE ANCHE PARZIALE DEL  
CONTENUTO DI QUESTO DOCUMENTO.**