



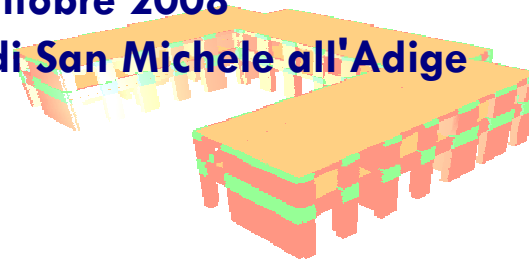
PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO  
DIPARTIMENTO LAVORI PUBBLICI, TRASPORTI E RETI

**TERZO EVENTO SULLE NORME TECNICHE 2008:  
LE COSTRUZIONI DI MURATURA NUOVE ED ESISTENTI CON IL D.M. 14/01/2008**



22 ottobre 2008

Istituto Agrario di San Michele all'Adige



## ***Verifica sismica delle costruzioni esistenti in muratura***



**GUIDO MAGENES**

Università di Pavia - EUCENTRE

[guido.magenes@unipv.it](mailto:guido.magenes@unipv.it)

## Documenti di riferimento

- Min. delle Infrastrutture, **Norme Tecniche per le Costruzioni**, D.M. 14 gennaio 2008 (G.U. n. 29 del 4.02.2008 suppl. ord. n° 30)
- *Cons. Sup. LL.PP., “Istruzioni per l’applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M.14/1/2008”, bozza*
- Min. per i Beni e le Attività Culturali, **Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale**, G.U. n. 24 del 29/01/2008
- Ordinanza Pres. Cons. Min. n. 3274 "**Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica**", Suppl. ord. alla G:U. n. 105 del 8/5/2003, e **successive modifiche ed integrazioni** (in particolare la OPCM 3431 del 3/5/05).

# **La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi sugli edifici esistenti nelle NTC 14/01/08**

## **Cap. 8 COSTRUZIONI ESISTENTI**

**8.1 OGGETTO**

**8.2 CRITERI GENERALI**

**8.3 VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA**

**8.4 CLASSIFICAZIONE DEGLI INTERVENTI**

**8.4.1 INTERVENTO DI ADEGUAMENTO**

**8.4.2 INTERVENTO DI MIGLIORAMENTO**

**8.4.3 RIPARAZIONE O INTERVENTO LOCALE**

**8.5 PROCEDURE PER LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA E LA REDAZIONE DEI PROGETTI**

**8.5.1 ANALISI STORICO-CRITICA**

**8.5.2 RILIEVO**

**8.5.3 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI MATERIALI**

**8.5.4 LIVELLI DI CONOSCENZA E FATTORI DI CONFIDENZA**

**8.5.5 AZIONI**

# La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi sugli edifici esistenti nelle NTC 14/01/08

## Cap. 8 COSTRUZIONI ESISTENTI (segue)

### 8.6 MATERIALI

### 8.7 VALUTAZIONE E PROGETTAZIONE IN PRESENZA DI AZIONI SISMICHE

#### 8.7.1 COSTRUZIONI IN MURATURA

#### 8.7.2 COSTRUZIONI IN CEMENTO ARMATO O IN ACCIAIO

#### 8.7.3 EDIFICI MISTI

#### 8.7.4 CRITERI E TIPI D'INTERVENTO

#### 8.7.5 PROGETTO DELL'INTERVENTO

- I contenuti del Cap. 8 delle NTC si rifanno in buona parte all'impostazione degli Eurocodici e della OPCM 3274/3431
- Il Capitolo 8 delle NTC è molto scarno rispetto agli altri capitoli delle norme, e riporta solamente una serie di criteri generali la cui implementazione di dettaglio è evidentemente lasciata al progettista.
- Nella stesura delle NTC e della bozza di Circolare è stato possibile apportare dei miglioramenti rispetto ai documenti di riferimento.

## C8.2 Criteri generali

.....

*I contenuti del Cap. 8 delle NTC e della Circolare costituiscono un riferimento generale che può essere integrato, in casi particolari, da valutazioni specifiche ed anche alternative da parte del progettista, comunque basati su criteri e metodi di comprovata validità.*

## Riferimenti “ufficiali” (Cap. 12 delle NTC)

In mancanza di specifiche indicazioni, a integrazione delle presenti norme e per quanto con esse non in contrasto, possono essere utilizzati i documenti di seguito indicati che costituiscono riferimenti di consolidata validità:

- Istruzioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;
- Linee Guida del Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;
- Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale come licenziate dal Cons. Sup. LL.PP.
- Istruzioni e documenti tecnici del Consiglio Nazionale delle Ricerche (C.N.R.);

Possono essere utilizzati anche altri codici internazionali, purché sia dimostrato che garantiscano livelli di sicurezza non inferiori a quelli delle presenti Norme tecniche.

## 8.2 Criteri generali

.....

Nel caso di interventi non dichiaratamente strutturali (impiantistici, redistribuzione degli spazi...) dovrà essere valutata la loro possibile interazione con gli SLU e gli SLE della struttura o di parti di essa)

### C8.2

....

*Esempi tipici: creazione o variazione di impianti nelle strutture murarie, a causa dell'inserimento di condutture in breccia nelle pareti portanti o della realizzazione di nicchie, che indeboliscono sensibilmente i singoli elementi strutturali o la connessione tra le varie parti, oppure nello spostamento o nella demolizione di "tramezzature" aventi rigidità e resistenza non trascurabili.*



## 8.2 Criteri generali

.....

La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi su costruzioni esistenti devono tenere conto dei seguenti aspetti:

- la costruzione riflette lo stato delle conoscenze al tempo della sua realizzazione;
- possono essere insiti e non palesi difetti di impostazione e di realizzazione;
- la costruzione può essere stata soggetta ad azioni, anche eccezionali, i cui effetti non siano completamente manifesti;
- le strutture possono presentare degrado e/o modificazioni significative rispetto alla situazione originaria.

## 8.2 Criteri generali

Nella definizione dei modelli strutturali, si dovrà, inoltre, tenere conto che:

- la geometria e i dettagli costruttivi sono definiti e la loro conoscenza dipende solo dalla documentazione disponibile e dal livello di approfondimento delle indagini conoscitive;
- la conoscenza delle proprietà meccaniche dei materiali non risente delle incertezze legate alla produzione e posa in opera ma solo della omogeneità dei materiali stessi all'interno della costruzione, del livello di approfondimento delle indagini conoscitive e dell'affidabilità delle stesse;
- i carichi permanenti sono definiti e la loro conoscenza dipende dal livello di approfondimento delle indagini conoscitive.

Si dovrà prevedere l'impiego di metodi di analisi e di verifica dipendenti dalla completezza e dall'affidabilità dell'informazione disponibile e l'uso, nelle verifiche di sicurezza, di adeguati “fattori di confidenza”, che modificano i parametri di capacità in ragione del livello di conoscenza relativo a geometria, dettagli costruttivi e materiali,

## C8.2 Criteri generali

*Nelle costruzioni esistenti è cruciale la conoscenza della struttura (geometria e dettagli costruttivi) e dei materiali che la costituiscono (calcestruzzo, acciaio, mattoni, malta). È per questo che viene introdotta un'altra categoria di fattori rispetto alle nuove costruzioni, i “fattori di confidenza”, strettamente legati al livello di conoscenza conseguito nelle indagini conoscitive, e che vanno preliminarmente a ridurre i valori medi di resistenza dei materiali della struttura esistente, per ricavare i valori da adottare, nel progetto o nella verifica, e da ulteriormente ridurre, quando previsto, mediante i coefficienti parziali di sicurezza.*

## 8.3 Valutazione della sicurezza

La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi sulle costruzioni esistenti potranno essere eseguiti con riferimento ai soli SLU; nel caso in cui si effettui la verifica anche nei confronti degli SLE i relativi livelli di prestazione possono essere stabiliti dal Progettista di concerto con il Committente.

Le Verifiche agli SLU possono essere eseguite rispetto alla condizione di salvaguardia della vita umana (SLV) o, in alternativa, alla condizione di collasso (SLC).

La norma specifica inoltre in quali condizioni le costruzioni esistenti devono essere sottoposte a valutazione della sicurezza.

## 3.2.1 Stati limite e relative probabilità di superamento

Gli **stati limite di esercizio** (nella verifica sismica) sono:

-**Stato Limite di Operatività** (SLO): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;

- **Stato Limite di Danno** (SLD): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

## 3.2.1 Stati limite e relative probabilità di superamento

Gli **stati limite ultimi** (nella verifica sismica) sono:

- **Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV)**: a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- **Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC)**: a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

## 3.2.1 Stati limite e relative probabilità di superamento (per la verifica sismica)

Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento ( $P_{V_R}$ ), cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente in ciascuno degli stati limite considerati, sono:

**Tabella 3.2.I** – Probabilità di superamento  $P_{V_R}$  al variare dello stato limite considerato

Stati Limite		$P_{V_R}$ : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento $V_R$	
Stati limite di esercizio	SLO	81%	( $T_R=30$ anni)
	SLD	63%	( $T_R=50$ anni)
Stati limite ultimi	SLV	10%	( $T_R=475$ anni)
	SLC	5%	( $T_R=975$ anni)

( $T_R$  valutati per  $V_R = 50$  anni)

Qualora la protezione nei confronti degli stati limite di esercizio sia di prioritaria importanza, i valori di  $P_{V_R}$  forniti in tabella devono essere ridotti in funzione del grado di protezione che si vuole raggiungere.

## 3.2.1 Stati limite e relative probabilità di superamento (per la verifica sismica)

Periodo di riferimento per l'azione sismica  $V_R$

Tabella C8.1 Periodo di riferimento dell'azione sismica  $V_R = V_N C_U$  (anni)

TIPI DI COSTRUZIONE	$V_N$	Classe d'uso →			
		I	II	III	IV
		Coeff. $C_U$ →			
		0,70	1,00	1,50	2,00
		$V_R$			
Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva	10	35	35	35	35
Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	50	35	50	75	100
Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	100	70	100	150	200



## 8.3 Valutazione della sicurezza (segue)

La valutazione della sicurezza deve permettere di stabilire se:

- l'uso della costruzione possa continuare senza interventi;
- l'uso debba essere modificato (declassamento, cambio di destinazione e/o imposizione di limitazioni e/o cautele nell'uso);
- sia necessario procedere ad aumentare o ripristinare la capacità portante.

La valutazione della sicurezza dovrà effettuarsi ogni qual volta si eseguano gli interventi strutturali di cui al punto 8.4, e dovrà determinare il livello di sicurezza prima e dopo l'intervento.

Il Progettista dovrà esplicitare, in un'apposita relazione, i livelli di sicurezza attuali o raggiunti con l'intervento e le eventuali conseguenti limitazioni da imporre nell'uso della costruzione.

### C.8.3 Valutazione della sicurezza

.....

*Per valutazione della sicurezza si intende un procedimento quantitativo volto a:*

*- stabilire se una struttura esistente è in grado o meno di resistere alle combinazioni delle azioni di progetto contenute nelle NTC, oppure*

*-a determinare l'entità massima delle azioni, considerate nelle combinazioni di progetto previste, che la struttura è capace di sostenere con i margini di sicurezza richiesti dalle NTC, definiti dai coefficienti parziali di sicurezza sulle azioni e sui materiali.*

.....

*Lo Stato limite di collasso (SLC) viene considerato solo per costruzioni di calcestruzzo armato o di acciaio. La verifica nei confronti di tale Stato limite può essere eseguita in alternativa a quella di Stato limite di salvaguardia della vita.*

## 8.4 Classificazione degli interventi

Si individuano le seguenti categorie di intervento:

- interventi di **adeguamento** atti a conseguire i livelli di sicurezza previsti dalle presenti norme;
- interventi di **miglioramento** atti ad aumentare la sicurezza strutturale esistente, pur senza necessariamente raggiungere i livelli richiesti dalle presenti norme;
- **riparazioni o interventi locali** che interessino elementi isolati, e che comunque comportino un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti.

Gli interventi di adeguamento e miglioramento devono essere sottoposti a collaudo statico.

Per i **beni di interesse culturale** in zone dichiarate a rischio sismico, ai sensi del comma 4 dell'art. 29 del D. lgs. 22 gennaio 2004, n. 42 “ Codice dei beni culturali e del paesaggio”, è in ogni caso **possibile limitarsi ad interventi di miglioramento** effettuando la relativa valutazione della sicurezza

## 8.4.1 Intervento di adeguamento

È fatto obbligo di procedere alla valutazione della sicurezza e, qualora necessario, all'adeguamento della costruzione, a chiunque intenda:

- a) **sopraelevare o ampliare** la costruzione mediante opere strutturalmente connesse alla costruzione esistente;
- b) **apportare variazioni di classe e/o di destinazione d'uso** che comportino incrementi dei carichi globali in fondazione superiori al 10%;
- c) **effettuare interventi strutturali volti a trasformare la costruzione mediante un insieme sistematico di opere** che portino ad un organismo edilizio diverso dal precedente.

In ogni caso, il progetto dovrà essere riferito all'intera costruzione e dovrà riportare le verifiche dell'intera struttura post-intervento, secondo le indicazioni del presente capitolo.

Una variazione dell'altezza dell'edificio, per la realizzazione di cordoli sommitali, sempre che resti immutato il numero di piani, non è considerata sopraelevazione o ampliamento, ai sensi del punto a). In tal caso non è necessario procedere all'adeguamento, salvo che non ricorrano le condizioni di cui ai precedenti punti b) o c).

## 8.4.2 Intervento di miglioramento

Rientrano negli interventi di miglioramento tutti gli interventi che siano comunque finalizzati ad accrescere la capacità di resistenza delle strutture esistenti alle azioni considerate.

È possibile eseguire interventi di miglioramento nei casi in cui non ricorrano le condizioni specificate al paragrafo 8.4.1.

Il progetto e la valutazione della sicurezza dovranno essere estesi a tutte le parti della struttura potenzialmente interessate da modifiche di comportamento, nonché alla struttura nel suo insieme.

### 8.4.3 Riparazione o intervento locale

In generale, gli interventi di questo tipo riguarderanno singole parti e/o elementi della struttura e interesseranno porzioni limitate della costruzione. Il progetto e la valutazione della sicurezza potranno essere riferiti alle sole parti e/o elementi interessati, per documentare che, rispetto alla configurazione precedente al danno, al degrado o alla variante, esse comportino un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti.

La relazione di cui al par. 8.3 che, in questi casi, potrà essere limitata alle sole parti interessate dall'intervento ed a quelle con esse interagenti, dovrà documentare le carenze strutturali riscontrate, risolte e/o persistenti, ed indicare le eventuali conseguenti limitazioni all'uso della costruzione.

### C.8.4.3 Riparazione o intervento locale

*Può rientrare in questa categoria anche la **sostituzione di coperture e solai**, solo a **condizione che ciò non comporti una variazione significativa di rigidezza nel proprio piano**, importante ai fini della ridistribuzione di forze orizzontali, né un aumento dei carichi verticali statici.*

*Interventi di **ripristino o rinforzo delle connessioni tra elementi strutturali diversi** (ad esempio tra pareti murarie, tra pareti e travi o solai, anche attraverso l'introduzione di catene/tiranti) ricadono in questa categoria, in quanto comunque migliorano anche il comportamento globale della struttura, particolarmente rispetto alle azioni sismiche.*

*Infine, interventi di **variazione della configurazione di un elemento strutturale**, attraverso la sua sostituzione o un rafforzamento localizzato (ad esempio l'apertura di un vano in una parete muraria, accompagnata da opportuni rinforzi) possono rientrare in questa categoria solo a condizione che si dimostri che la rigidezza dell'elemento variato non cambi significativamente e che la resistenza e la capacità di deformazione, anche in campo plastico, non peggiorino ai fini del comportamento rispetto alle azioni orizzontali.*

## 8.5 Procedure per la valutazione della sicurezza e la redazione dei progetti

Nelle costruzioni esistenti le situazioni concretamente riscontrabili sono le più diverse ed è quindi impossibile prevedere regole specifiche per tutti i casi.

Di conseguenza, il modello per la valutazione della sicurezza dovrà essere definito e giustificato dal Progettista, caso per caso, in relazione al comportamento strutturale attendibile della costruzione.



## 8.5.1 Analisi storico-critica

Ai fini di una corretta individuazione del sistema strutturale esistente e del suo stato di sollecitazione è importante ricostruire il processo di realizzazione e le successive modificazioni subite nel tempo dal manufatto, nonché gli eventi che lo hanno interessato..

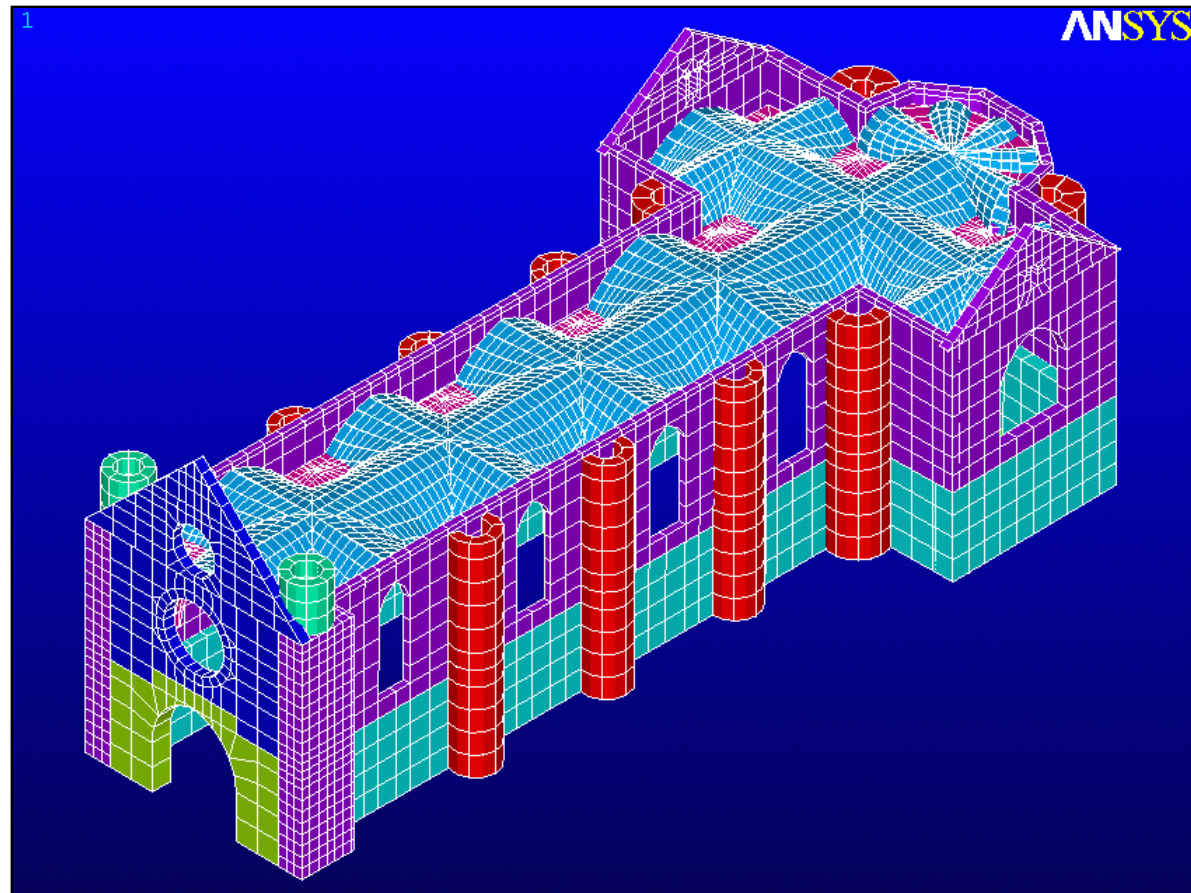
*(Circ. NTC)*

*Soprattutto nel caso di edifici in muratura, sia in assenza sia in presenza di documentazione parziale, prima di procedere alle indispensabili operazioni di rilievo geometrico, è opportuno **svolgere delle considerazioni sullo sviluppo storico del quartiere in cui l'edificio è situato (a meno che si tratti di edifici isolati)**, basandosi su testi specialistici, cercando di acquisire informazioni sugli aspetti urbanistici e storici che ne hanno condizionato e guidato lo sviluppo, con particolare riferimento agli aspetti di interesse per l'edificio in esame.*

*La ricostruzione della storia edificatoria dell'edificio, o della costruzione più in generale, consentirà anche di **verificare quanti e quali terremoti esso abbia subito in passato**. Questo sorta di valutazione sperimentale della vulnerabilità sismica dell'edificio rispetto ai terremoti passati è di notevole utilità, perché consente di valutarne il funzionamento, a patto che la sua configurazione strutturale e le caratteristiche dei materiali costruttivi non siano stati, nel frattempo, modificati in maniera significativa.*

# La Basilica di San Francesco d'Assisi

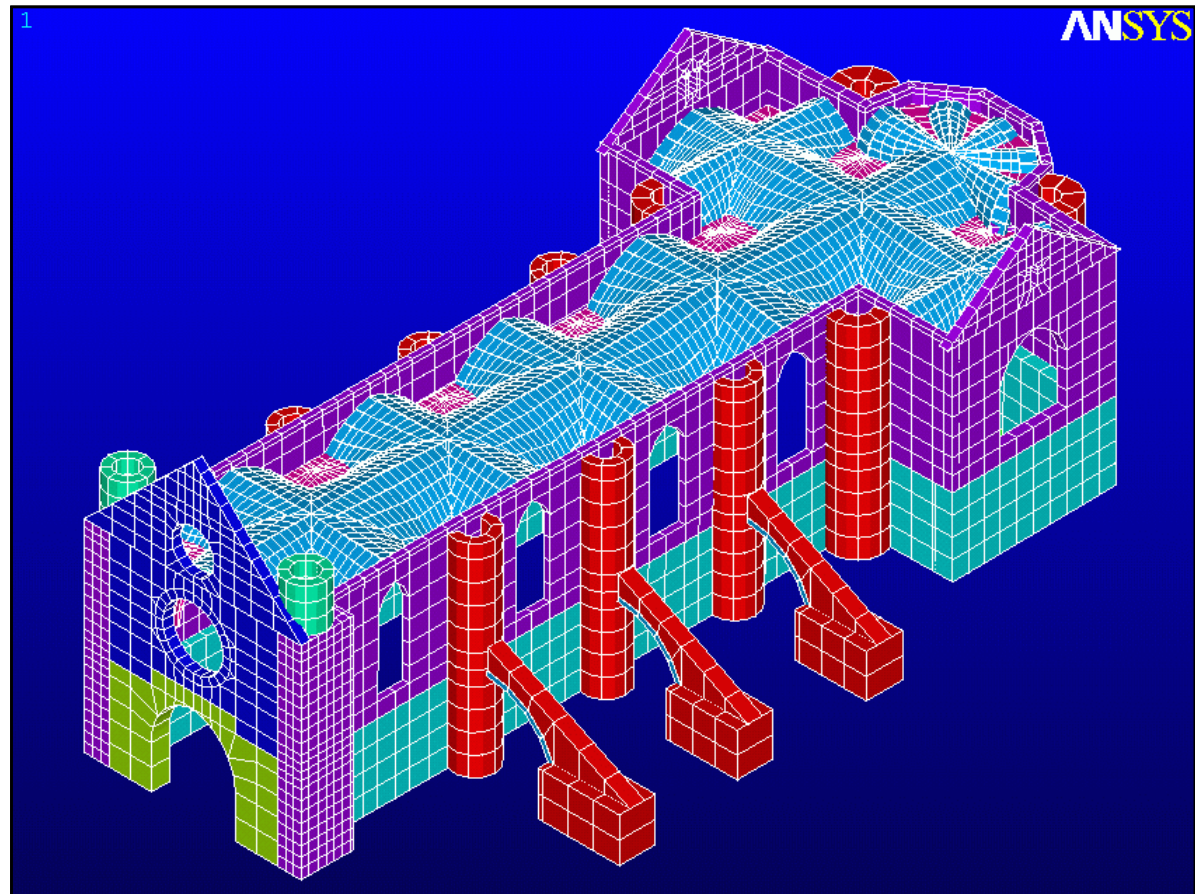
DAL 1228 AL XIV SECOLO



**Influenza delle fasi costruttive** (per cortese concessione di S.Lagomarsino)

# La Basilica di San Francesco d'Assisi

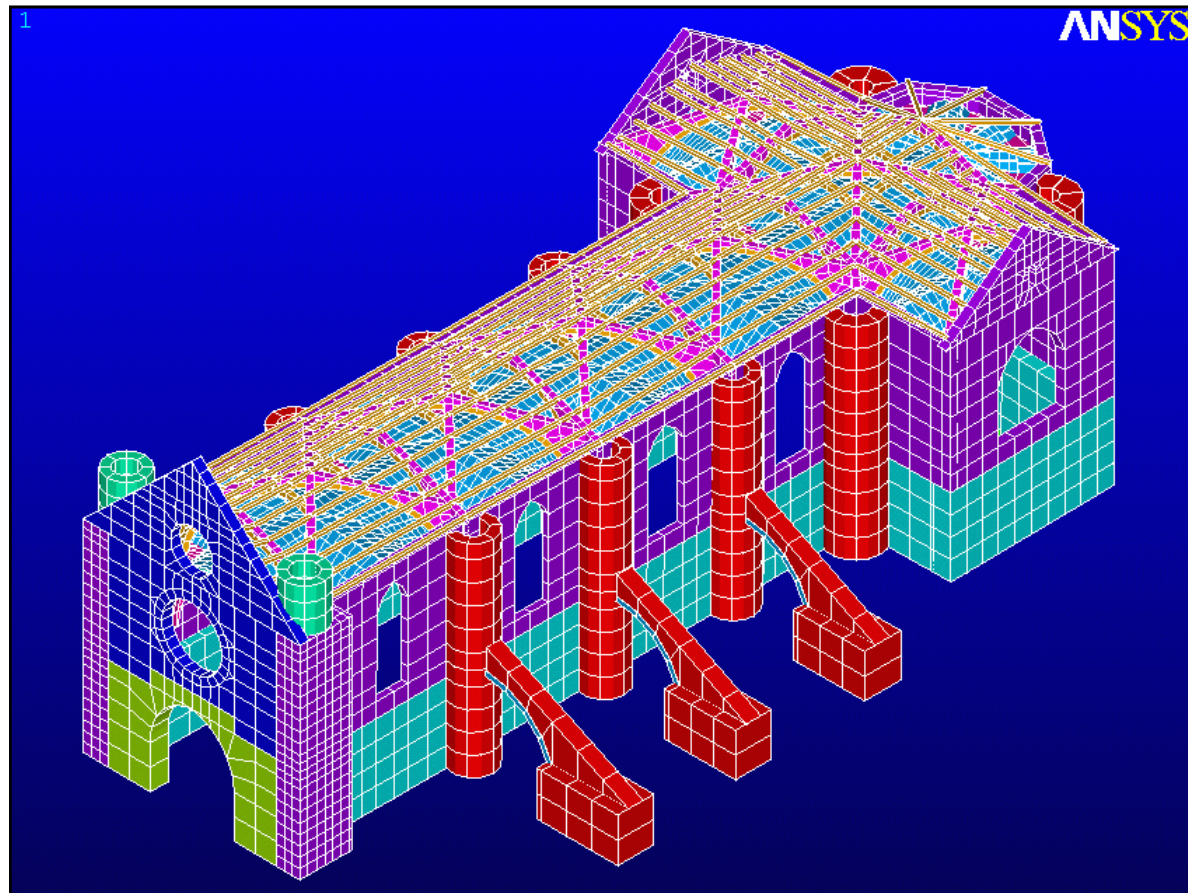
XIV SECOLO



**Influenza delle fasi costruttive** (per cortese concessione di S.Lagomarsino)

# La Basilica di San Francesco d'Assisi

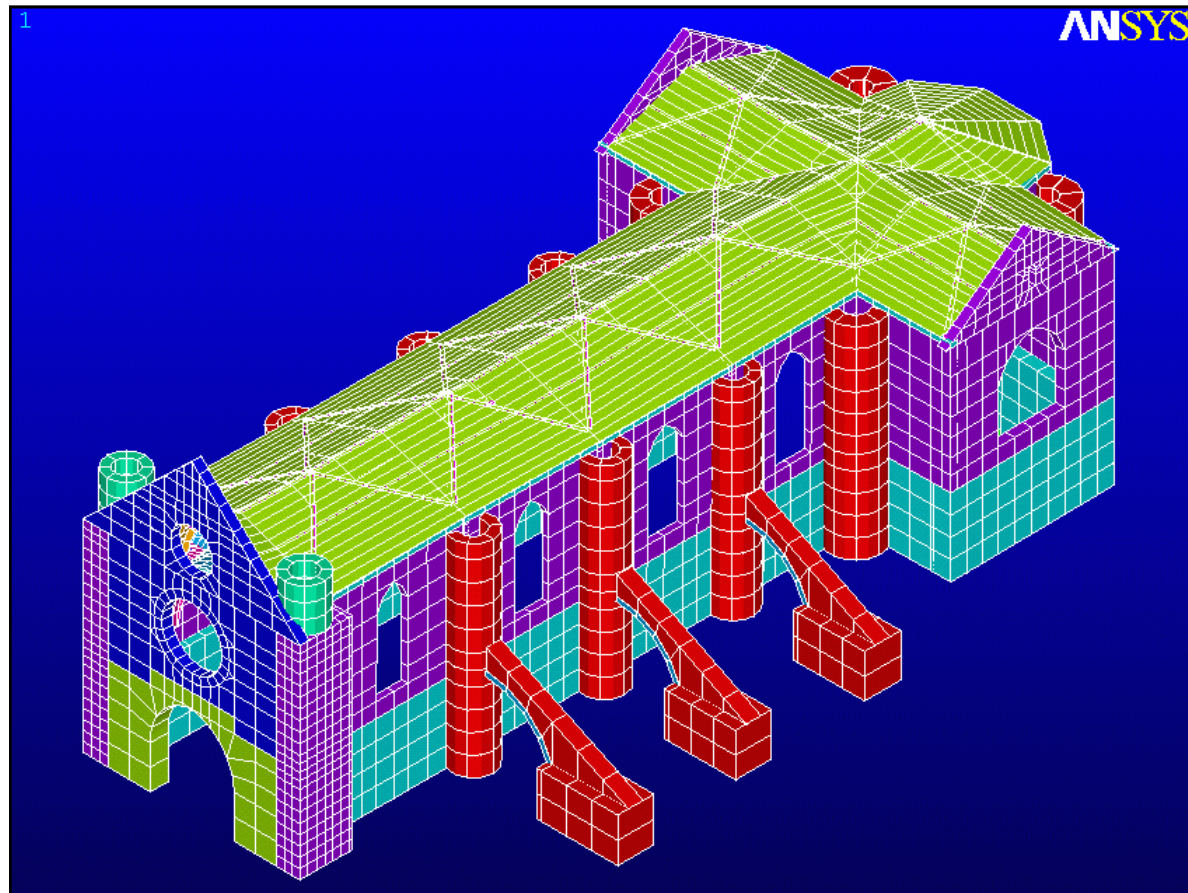
1475



**Influenza delle fasi costruttive** (per cortese concessione di S.Lagomarsino)

# La Basilica di San Francesco d'Assisi

1957

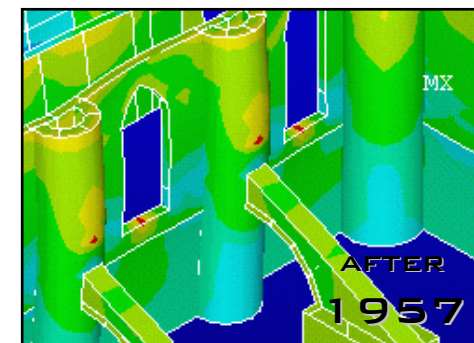
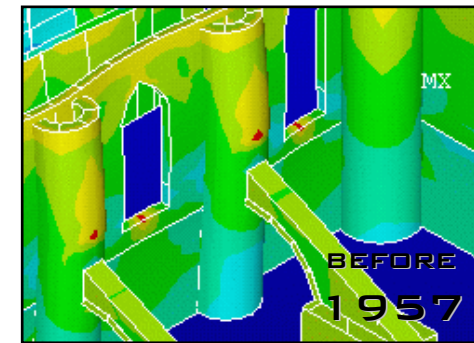
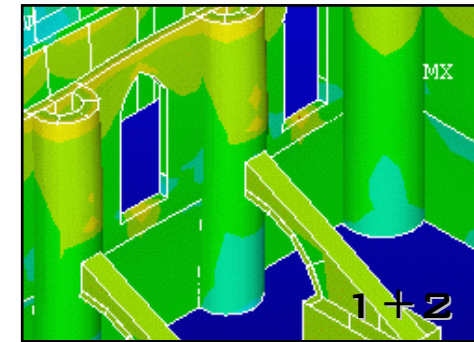
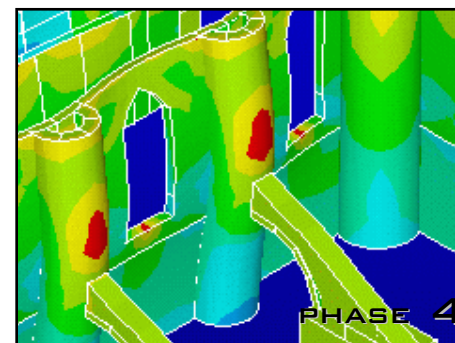
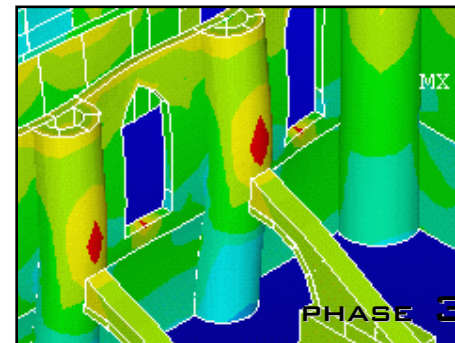
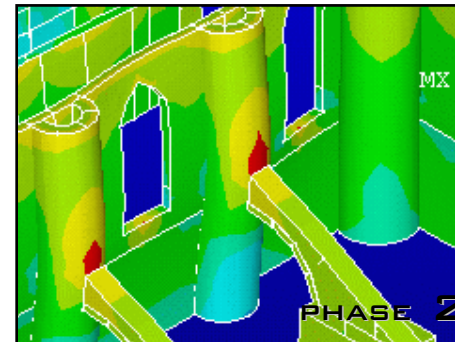
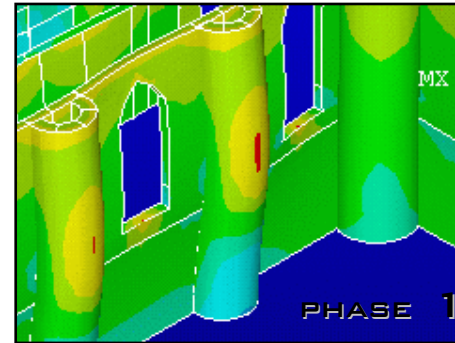


**Influenza delle fasi costruttive** (per cortese concessione di S.Lagomarsino)

## TENSIONI VERTICALI DI COMPRESSIONE NELLE PARETI LATERALI

### ANALISI IN 1 FASE

STEP	SPOSTAMENTO ALLE IMPOSTE DELLE VOLTE	
	ANALISI PER FASI	ANALISI IN 1 FASE
2	4.7	1.9
3	5.5	3.4
4	6.5	3.7



## 8.5.2 Rilievo

Il rilievo geometrico-strutturale dovrà essere riferito sia alla geometria complessiva dell'organismo che a quella degli elementi costruttivi, comprendendo i rapporti con le eventuali strutture in aderenza. Nel rilievo dovranno essere rappresentate le modificazioni intervenute nel tempo, come desunte dall'analisi storico-critica.

Il rilievo deve individuare l'organismo resistente della costruzione, tenendo anche presente la qualità e lo stato di conservazione dei materiali e degli elementi costitutivi.

Dovranno altresì essere rilevati *i dissesti*, in atto o stabilizzati, ponendo particolare attenzione all'individuazione dei *quadri fessurativi* e dei *meccanismi di danno*.

### 8.5.3 Caratterizzazione meccanica dei materiali

Per conseguire un'adeguata conoscenza delle caratteristiche dei materiali e del loro degrado, ci si baserà su documentazione già disponibile, su verifiche visive in situ e su indagini sperimentali. Le indagini dovranno essere motivate, per tipo e quantità, dal loro effettivo uso nelle verifiche; nel caso di beni culturali e nel recupero di centri storici, dovrà esserne considerato l'impatto in termini di conservazione del bene.

### 8.5.4 Livelli di conoscenza e fattori di confidenza

Sulla base degli approfondimenti effettuati nelle fasi conoscitive sopra riportate, saranno individuati i “livelli di conoscenza” dei diversi parametri coinvolti nel modello (geometria, dettagli costruttivi e materiali), e definiti i correlati fattori di confidenza, da utilizzare come ulteriori coefficienti parziali di sicurezza che tengono conto delle carenze nella conoscenza dei parametri del modello.



## C8A.1 Dati necessari e identificazione del livello di conoscenza

La **conoscenza dell'edificio** in muratura oggetto della verifica risulta di fondamentale importanza, e può essere conseguita con **diversi livelli di approfondimento**, in funzione dell'accuratezza delle operazioni di rilievo, delle ricerche storiche, e delle indagini sperimentali.

Tali operazioni saranno **funzione degli obiettivi preposti** ed andranno ad interessare tutto o in parte l'edificio, in funzione della ampiezza e della rilevanza dell'intervento previsto.

Il **piano delle indagini** fa comunque parte sia della fase diagnostica che del progetto vero e proprio, e dovrà essere predisposto nell'ambito di un quadro generale.

**C8A.1.1 Geometria**

**C8A.1.2 Dettagli costruttivi**

**C8A.1.3 Proprietà dei materiali**

## C8A.1.1 Geometria

L'operazione comprende il **rilievo, piano per piano**, di :

- *tutti gli elementi in muratura*
- *eventuali nicchie, cavità, canne fumarie*
- *il rilievo delle volte (spessore e profilo)*
- *dei solai e della copertura (tipologia e orditura)*
- *delle scale (tipologia strutturale)*
- *la individuazione dei carichi gravanti su ogni elemento di parete*
- *la tipologia delle fondazioni.*

La rappresentazione dei risultati del rilievo verrà effettuata attraverso **piante, alzati e sezioni**.

Dovrà inoltre essere rilevato e rappresentato l'eventuale quadro fessurativo, classificando ciascuna lesione secondo la tipologia (distacco, rotazione, scorrimento, spostamenti fuori del piano, ...), e deformativo (fuori piombo, rigonfiamenti, depressioni nelle volte, ...).

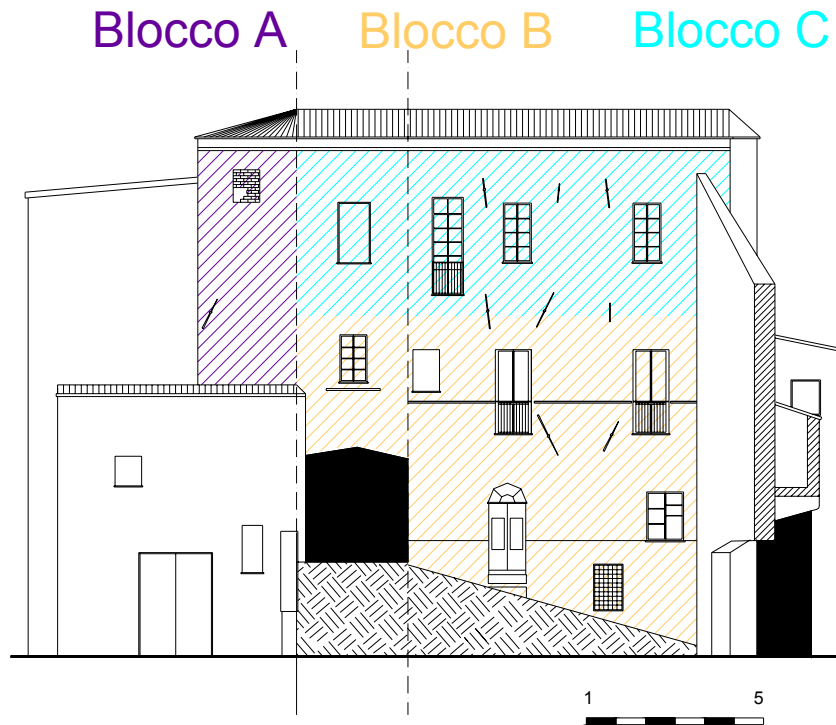
La **finalità** è di consentire **l'individuazione dell'origine e delle possibili evoluzioni** delle problematiche strutturali dell'edificio.

## C8A.1.2 Dettagli costruttivi

*I dettagli costruttivi da esaminare sono relativi ai seguenti elementi:*

- a) qualità del collegamento tra pareti verticali;*
- b) qualità del collegamento tra orizzontamenti e pareti ed eventuale presenza di cordoli di piano o di altri dispositivi di collegamento;*
- c) esistenza di architravi strutturalmente efficienti al di sopra delle aperture;*
- d) presenza di elementi strutturalmente efficienti atti ad eliminare le spinte eventualmente presenti;*
- e) presenza di elementi, anche non strutturali, ad elevata vulnerabilità;*
- f) tipologia della muratura (a un paramento, a due o più paramenti, con o senza riempimento a sacco con o senza collegamenti trasversali, ...), e sue caratteristiche costruttive (eseguita in mattoni o in pietra, regolare, irregolare, ...).*

## Analisi stratigrafica per volumi

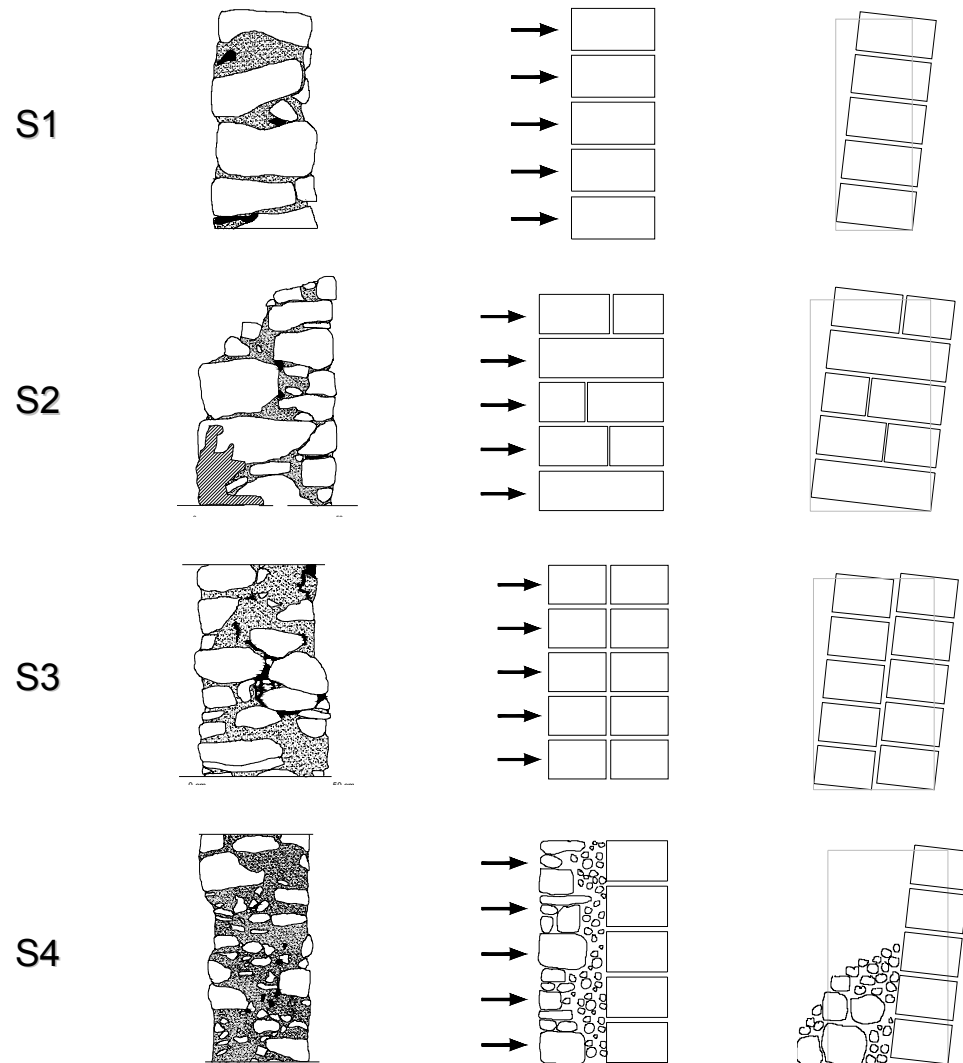


## Qualità del collegamento tra pareti verticali

a) non connesse, b) connesse



# Tipologie murarie : le sezioni



tre paramenti

## C8A.1.2 Dettagli costruttivi (continua)

*Si distinguono:*

**Verifiche in-situ limitate:** sono basate su *rilievi di tipo visivo* effettuati ricorrendo, di regola, a rimozione dell'intonaco e saggi nella muratura che consentano di esaminarne le caratteristiche sia in superficie che nello spessore murario, e di ammorsamento tra muri ortogonali e dei solai nelle pareti. I dettagli costruttivi di cui ai punti a) e b) possono essere valutati anche sulla base di una conoscenza appropriata delle tipologie dei solai e della muratura.

In assenza di un rilievo diretto, o di dati sufficientemente attendibili, dovranno comunque essere assunte, nelle successive fasi di modellazione, analisi e verifiche, le **ipotesi più cautelative**.

**Verifiche in-situ estese ed esaustive:** sono basate su *rilievi di tipo visivo*, effettuati ricorrendo, di regola, a saggi nella muratura che consentano di esaminarne le caratteristiche sia in superficie che nello spessore murario, e di ammorsamento tra muri ortogonali e dei solai nelle pareti. *L'esame degli elementi di cui ai punti da a) ad f) è opportuno sia esteso in modo sistematico all'intero edificio.*

## C8A.1.3 Proprietà dei materiali

Particolare attenzione dovrà essere riservata alla **valutazione della qualità muraria**, con riferimento agli aspetti legati al rispetto o meno della “regola dell’arte”.

La finalità principale è quella di **stabilire se la muratura in esame è capace di un comportamento strutturale idoneo a sostenere le azioni statiche e dinamiche** prevedibili per l’edificio in oggetto.

Di particolare importanza risulta la presenza o meno di **elementi di collegamento trasversali** (es. diatoni), la forma, tipologia e dimensione degli elementi, la **tessitura**, l’orizzontalità delle giaciture, il regolare sfalsamento dei giunti, la **qualità e consistenza della malta**.

Di rilievo risulta anche la **caratterizzazione di malte** (tipo di legante, tipo di aggregato, rapporto legante/aggregato, livello di carbonatazione), e di **pietre e/o mattoni** (caratteristiche fisiche e meccaniche) mediante prove sperimentali. Malte e pietre sono prelevate in situ, avendo cura di prelevare le malte all’interno (ad almeno 5-6 cm di profondità nello spessore murario).

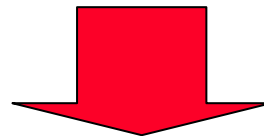
## C8A.1.3 Proprietà dei materiali (continua)

Si distinguono:

**Indagini in-situ *limitate***

**Indagini in-situ *estese***

**Indagini in-situ *esaustive***



**Tabella C8B.1 dell'allegato C8B:**

Valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura

**Tabella C8B.2 dell'allegato C8B:**

Coefficienti correttivi dei parametri meccanici



## C8A.1.3 Proprietà dei materiali (continua)

### Indagini in-situ *limitate*

*Servono a completare le informazioni sulle proprietà dei materiali ottenute dalla letteratura, o dalle regole in vigore all'epoca della costruzione, e per individuare la tipologia della muratura (nella tabella C8B.1 dell'allegato C8B sono riportate alcune tipologie ricorrenti).*

*Sono basate su **esami visivi della superficie muraria**. Tali esami visivi sono condotti dopo la rimozione di una zona di intonaco di almeno 1m x 1m, al fine di individuare forma e dimensione dei blocchi di cui è costituita, eseguita preferibilmente in corrispondenza degli angoli, al fine di verificare anche le ammorsature tra le pareti murarie.*

*E' da valutare, anche in maniera approssimata, la **compattezza della malta**. Importante è anche valutare la capacità degli elementi murari ad assumere un **comportamento monolitico** in presenza delle azioni sismiche, tenendo conto della la qualità della **connessione interna e trasversale** attraverso saggi localizzati, che interessino lo spessore murario.*

## C8A.1.3 Proprietà dei materiali (continua)

### Indagini in-situ estese

*Le indagini di cui al punto precedente devono essere effettuate in maniera estesa e sistematica, con saggi superficiali ed interni per ogni tipo di muratura presente. Prove con martinetto piatto doppio e prove di caratterizzazione della malta (tipo di legante, tipo di aggregato, rapporto legante/aggregato...), e eventualmente di pietre e/o mattoni (caratteristiche fisiche e meccaniche) consentono di individuare la tipologia della muratura (si veda la tabella C8B.1 per le tipologie più ricorrenti). E' opportuna una prova per ogni tipo di muratura presente. Metodi di prova non distruttivi (prove soniche, prove sclerometriche, penetrometriche per la malta, ...) possono essere impiegati a complemento delle prove richieste.*

*Qualora esista una chiara, comprovata corrispondenza tipologica per materiali, pezzatura dei conci, dettagli costruttivi, in sostituzione delle prove sull'edificio oggetto di studio possono essere utilizzate prove eseguite su altri edifici presenti nella zona dell'edificio. Le Regioni potranno, tenendo conto delle specificità costruttive del proprio territorio, definire zone omogenee a cui riferirsi a tal fine.*

## C8A.1.3 Proprietà dei materiali (continua)

### Indagini in-situ esaustive

*Servono per ottenere informazioni quantitative sulla resistenza del materiale. In aggiunta alle verifiche visive, ai saggi interni ed alle prove di cui ai punti precedenti, si effettua una ulteriore serie di prove sperimentali che, per numero e qualità, siano tali da consentire di valutare le caratteristiche meccaniche della muratura.*

*La misura delle caratteristiche meccaniche della muratura si ottiene mediante esecuzione di prove, in situ o in laboratorio (su elementi non disturbati prelevati dalle strutture dell'edificio).*

*Le prove possono in generale comprendere prove di compressione diagonale su pannelli o prove combinate di compressione verticale e taglio. Metodi di prova non distruttivi possono essere impiegati in combinazione, ma non in completa sostituzione di quelli sopra descritti.*

*Qualora esista una chiara, comprovata corrispondenza tipologica per materiali, pezzatura dei conci, dettagli costruttivi, in sostituzione delle prove sull'edificio oggetto di studio possono essere utilizzate prove eseguite su altri edifici presenti nella zona dell'edificio. Le Regioni potranno, tenendo conto delle specificità costruttive del proprio territorio, definire zone omogenee a cui riferirsi a tal fine.*

*I risultati delle prove sono esaminati e considerati nell'ambito di un quadro di riferimento tipologico generale che tenga conto dei risultati delle prove sperimentali disponibili in letteratura sino a quel momento per le tipologie murarie in oggetto, e che consenta di valutare, anche in termini statistici, la effettiva rappresentatività dei valori trovati. I risultati delle prove sono utilizzati secondo quanto riportato al par.*

**C8A.1.4**

# PROVE DI COMPRESSIONE DIAGONALE

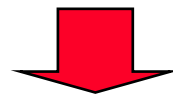


## C8A.1.4 Livelli di conoscenza

Con riferimento al livello di conoscenza acquisito si definiscono i valori medi dei parametri meccanici ed i fattori di confidenza secondo quanto segue.

Il **livello di conoscenza LC3** si intende raggiunto quando siano stati effettuati il rilievo geometrico, verifiche in situ estese ed esaustive sui dettagli costruttivi, indagini in situ esaustive sulle proprietà dei materiali.

Il **livello di conoscenza LC2** si intende raggiunto quando siano stati effettuati verifiche in situ estese ed esaustive sui dettagli costruttivi ed indagini in situ estese sulle proprietà dei materiali.



Livello di Conoscenza	Geometria	Dettagli costruttivi	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Rilievo strutturale	Limitate verifiche in-situ	Limitate indagini in-situ	Tutti	1.35
LC2		Estese ed esaustive verifiche in-situ	Estese indagini in-situ	Tutti	1.20
LC3			Esaustive indagini in-situ	Tutti	1.00

## C8A.1.4 Livelli di conoscenza (continua)

Per i diversi livelli di conoscenza, per ogni tipologia muraria, i valori medi dei parametri meccanici verranno definiti come segue:

**LC1 - Resistenze:** i **minimi** degli intervalli riportati in tabella C8B.1 per la tipologia muraria in considerazione; **moduli elastici:** i **valori medi** degli intervalli riportati nella tabella suddetta

**LC2 – Resistenze:** **medie** degli intervalli riportati in tabella C8B.1 per la tipologia muraria in considerazione; **moduli elastici:** **valori medi** degli intervalli riportati nella tabella suddetta.

## 11.5.3 Livelli di conoscenza (continua)

**LC3 – caso a)** Nel caso siano disponibili **tre o più valori sperimentali di resistenza**. Resistenze: **media dei risultati** delle prove; moduli elastici: **media delle prove o valori medi degli intervalli** riportati nella tabella C8B.1 per la tipologia muraria in considerazione.

**LC3 – caso b)** Nel caso siano disponibili **due valori sperimentali di resistenza**. Se il valore medio delle **resistenze sperimentali** è **compreso** nell'intervallo riportato nella tabella C8B.1 assumerà come resistenza il **valore medio** dell'intervallo. Se il valore di resistenza è **maggiore dell'estremo superiore** dell'intervallo si assumerà quest'ultimo come resistenza, se è **inferiore** al minimo dell'intervallo, si utilizzerà come valore medio il **valore medio sperimentale**. Per i **moduli elastici** vale quanto indicato per il caso LC3 – caso a.

**LC3 – caso c)** Nel caso sia disponibile **un valore sperimentale di resistenza**. Se il valore di **resistenza** è **compreso** nell'intervallo riportato nella tabella C8B.1 per la tipologia muraria in considerazione, oppure **superiore**, si assumerà come resistenza il **valore medio** dell'intervallo. Se il valore di resistenza è **inferiore** al minimo dell'intervallo, si utilizzerà come valore medio il **valore sperimentale**. Per i **moduli elastici** vale quanto indicato per il caso LC3 – caso a.

## Tabella C8B.1 dell'allegato C8B:

Valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura

Tipologia di muratura	$f_m$	$\tau_0$	E	G	w (kN/m <sup>3</sup> )
	(N/cm <sup>2</sup> )	(N/cm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	
	Min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100	2,0	690	230	19
	180	3,2	1050	350	
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200	3,5	1020	340	20
	300	5,1	1440	480	
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260	5,6	1500	500	21
	380	7,4	1980	660	
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140	2,8	900	300	16
	240	4,2	1260	420	
Muratura a blocchi lapidei squadriati	600	9,0	2400	780	22
	800	12,0	3200	940	
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240	6,0	1200	400	18
	400	9,2	1800	600	

(continua)



(segue)

Tipologia di muratura	$f_m$ (N/cm <sup>2</sup> )	$\tau_0$ (N/cm <sup>2</sup> )	E (N/mm <sup>2</sup> )	G (N/mm <sup>2</sup> )	w (kN/m <sup>3</sup> )
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤ 40%)	500	24	3500	875	15
	800	32	5600	1400	
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	400	30,0	3600	1080	12
	600	40,0	5400	1620	
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300	10,0	2700	810	11
	400	13,0	3600	1080	
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150	9,5	1200	300	12
	200	12,5	1600	400	
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	300	18,0	2400	600	14
	440	24,0	3520	880	

### **Le Regioni possono definire tabelle specifiche della la varietà tipologica e le corrispondenti caratteristiche meccaniche delle murature presenti sul proprio territorio**

I valori indicati nella Tabella C8B.1 (relativamente alle prime sei tipologie) sono da riferirsi a condizioni di muratura con malta di scadenti caratteristiche, giunti non particolarmente sottili ed in assenza di ricorsi o listature che, con passo costante, regolarizzino la tessitura ed in particolare l'orizzontalità dei corsi. Inoltre si assume che, per le murature storiche, queste siano a paramenti scollegati, ovvero manchino sistematici elementi di connessione trasversale (o di ammorsamento per ingranamento tra i paramenti murari).

I valori indicati per le murature regolari sono relativi a casi in cui la tessitura rispetta la regola dell'arte. Nei casi di tessitura scorretta (giunti verticali non adeguatamente sfalsati, orizzontalità dei filari non rispettata), i valori della tabella devono essere adeguatamente ridotti.

## Tabella C8B.2 dell'allegato C8B:

### Coefficienti correttivi dei parametri meccanici

Tipologia di muratura	Malta buona	Giunti sottili (<10 mm)	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Nucleo scadente e/o ampio	Iniezione di miscele leganti	Intonaco armato *
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	-	1,3	1,5	0,9	2	2,5
Muratura a conci sbozzati, con parametro di limitato spessore e	1,4	1,2	1,2	1,5	0,8	1,7	2
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	-	1,1	1,3	0,8	1,5	1,5
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,5	1,5	-	1,5	0,9	1,7	2
Muratura a blocchi lapidei squadrati	1,2	1,2	-	1,2	0,7	1,2	1,2
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	1,5	1,5	-	1,3	0,7	1,5	1,5

\* Valori da ridurre convenientemente nel caso di pareti di notevole spessore (p.es. > 70 cm).

## 8.5.5 Azioni

I valori delle azioni e le loro combinazioni da considerare nel calcolo, sia per la valutazione della sicurezza sia per il progetto degli interventi, sono quelle definite per le nuove costruzioni, salvo quanto di seguito precisato.

Per i carichi permanenti, un accurato rilievo geometrico-strutturale e dei materiali potrà consentire di adottare coefficienti parziali modificati, assegnando valori di  $\gamma_G$  adeguatamente motivati.

Nei casi per i quali è previsto l'adeguamento, i valori di calcolo delle altre azioni saranno quelle di riferimento, come definite al § 8.4.1, salvo che per esigenze di tutela di beni culturali e di recupero di centri storici e di ambiti urbani, per i quali saranno coerenti con le limitazioni d'uso riportate nella relazione di cui al par. 8.3.

## 8.6 Materiali

Gli interventi sulle strutture esistenti devono essere effettuati con i materiali previsti dalle presenti norme; possono altresì essere utilizzati materiali non tradizionali, purché nel rispetto di normative e documenti di comprovata validità, ovvero quelli elencati al cap. 12.

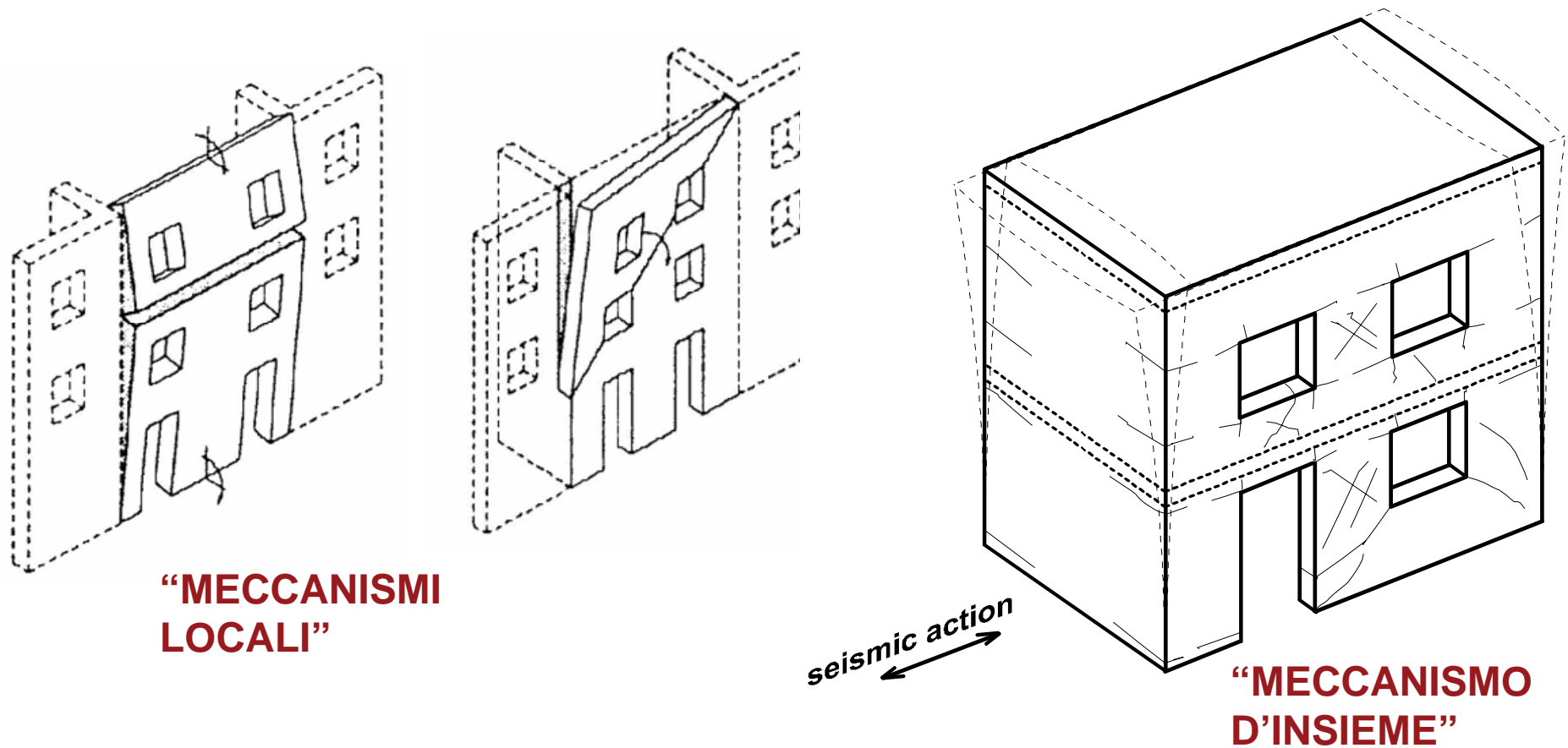
Nel caso di edifici in muratura è possibile effettuare riparazioni locali o integrazioni con materiale analogo a quello impiegato originariamente nella costruzione, purché durevole e di idonee caratteristiche meccaniche.

## 8.7 Valutazione e progettazione in presenza di azioni sismiche

....

### 8.7.1 Costruzioni in muratura

Nelle costruzioni esistenti in muratura soggette ad azioni sismiche si possono manifestare **meccanismi locali e meccanismi d'insieme**. I meccanismi locali interessano singoli pannelli murari o più ampie porzioni della costruzione, e sono favoriti dall'assenza o scarsa efficacia dei collegamenti tra pareti e orizzontamenti e negli incroci murari. I meccanismi globali sono quelli che interessano l'intera costruzione e impegnano i pannelli murari prevalentemente nel loro piano. **La sicurezza della costruzione deve essere valutata nei confronti di entrambi i tipi di meccanismo.**



- La massima resistenza al sisma in un edificio può essere sviluppata mediante una risposta globale (meccanismo d'insieme ) solo se sono impediti i meccanismi di collasso locali mediante opportuni accorgimenti costruttivi (collegamenti, incatenamenti...)

## 8.7.1 Costruzioni in muratura

.....

Per l'analisi sismica dei **meccanismi locali** si può far ricorso ai metodi dell'**analisi limite dell'equilibrio** delle strutture murarie, tenendo conto, anche se in forma approssimata, della resistenza a compressione, della tessitura muraria, della qualità della connessione tra le pareti murarie, della presenza di catene e tiranti. Con tali metodi è possibile valutare la capacità sismica in termini di **resistenza** (applicando un opportuno fattore di struttura) o di **spostamento** (determinando l'andamento dell'azione orizzontale che la struttura è progressivamente in grado di sopportare all'evolversi del meccanismo).

## Tipologie di meccanismi di danno locali

Negli edifici esistenti in muratura spesso avvengono collassi globali o parziali indotti dall'azione sismica, in genere per **perdita dell'equilibrio** di porzioni murarie.

### Muratura di buona qualità

Formazione di lesioni e comportamento per blocchi rigidi



### Muratura di qualità scadente

Fessurazione diffusa, disgregazione e distacco tra i paramenti

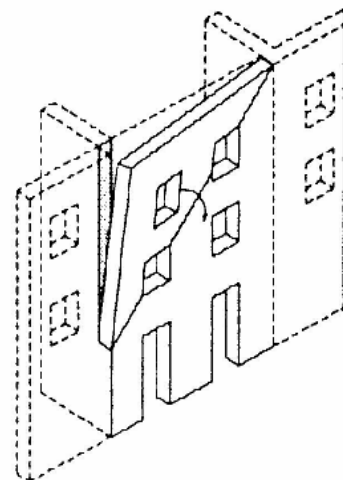
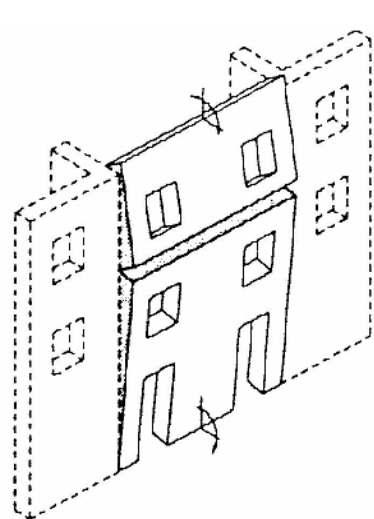




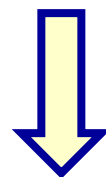
# Murature in pietra a paramenti non connessi



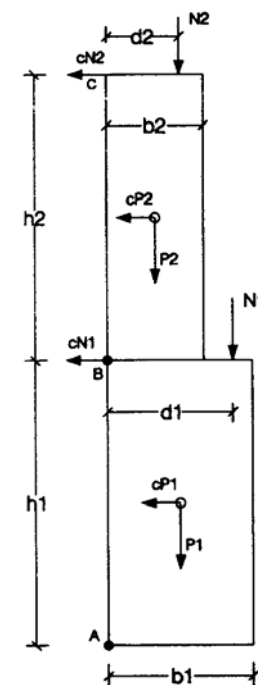
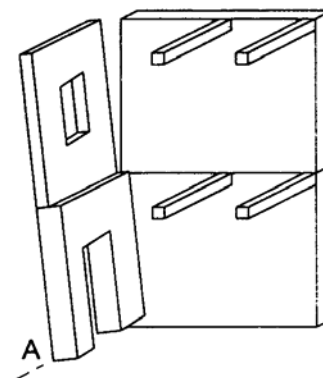
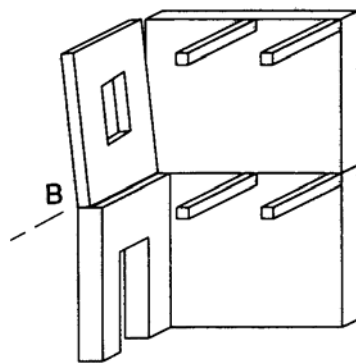
## Analisi della risposta (locale) fuori piano



**Analisi limite  
dell'equilibrio**



**Moltiplicatore di  
collasso statico**



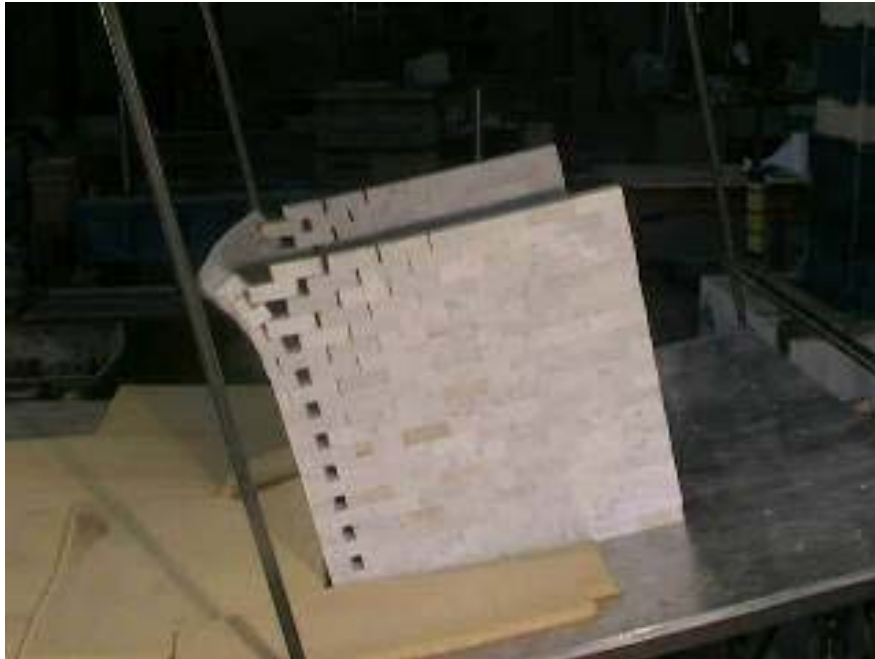
## Fattori che influenzano la resistenza statica

- **Geometria e vincoli**
- **Entità, distribuzione geometrica e natura dei carichi verticali**
- **Presenza di forze di attrito**
- **Forze esercitate da dispositivi come le catene**
- **Resistenza a compressione della muratura**

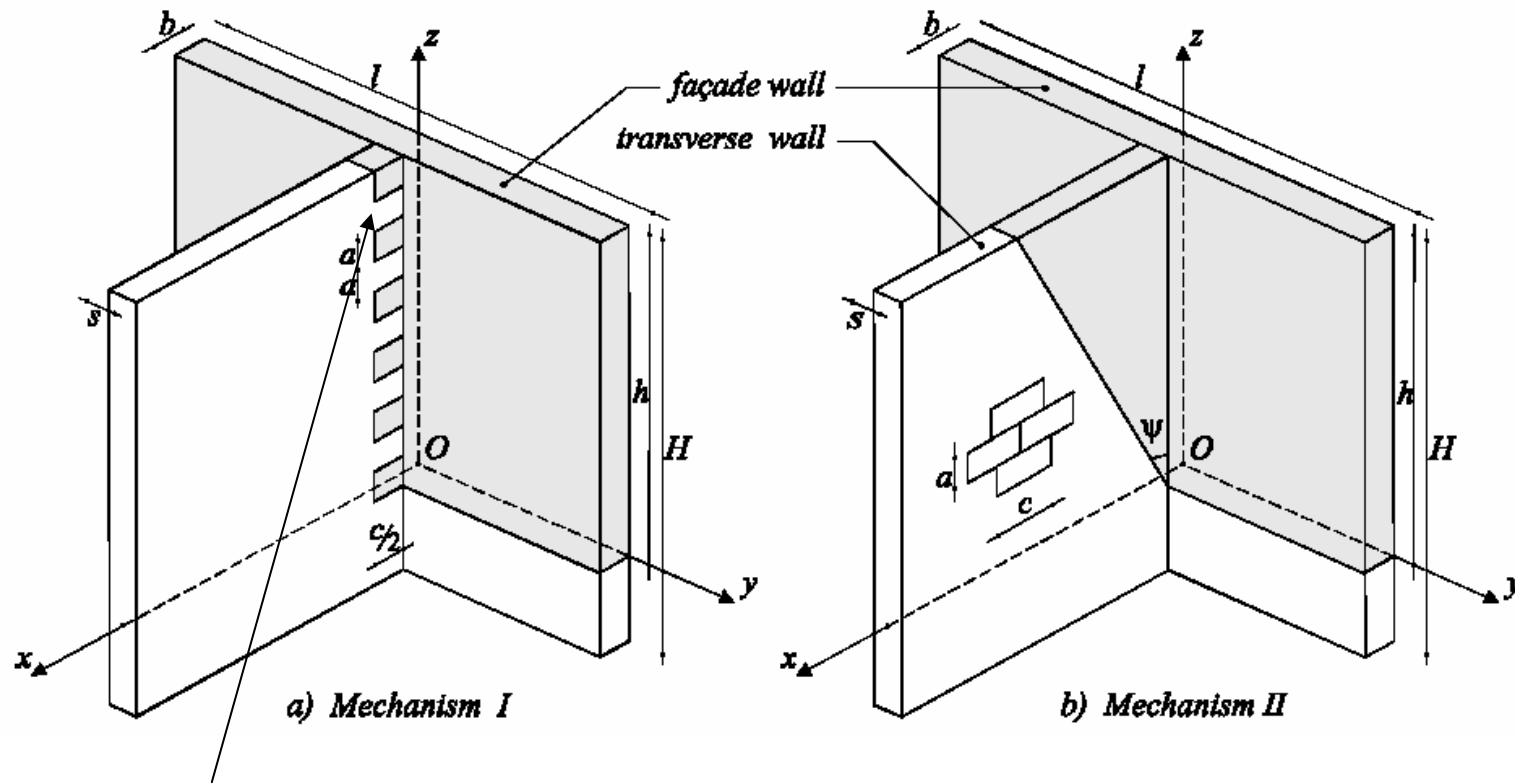
## Geometria, vincoli, distribuzione e natura dei carichi verticali

- La geometria del meccanismo può essere assunta in base alla conoscenza del comportamento ricorrente di strutture simili o può essere ipotizzato sulla base di fessure preesistenti;
- inoltre, è indispensabile considerare la qualità delle connessioni tra muri, la tessitura muraria, la presenza di catene, la possibile interazione con altre parti dell'edificio o degli edifici adiacenti;
- la definizione della geometria e dei vincoli è anche strettamente correlata alle modalità con cui i pesi verticali e le forze d'inerzia ad essi associati sono trasmessi alle pareti.

## FORZE DI ATTRITO



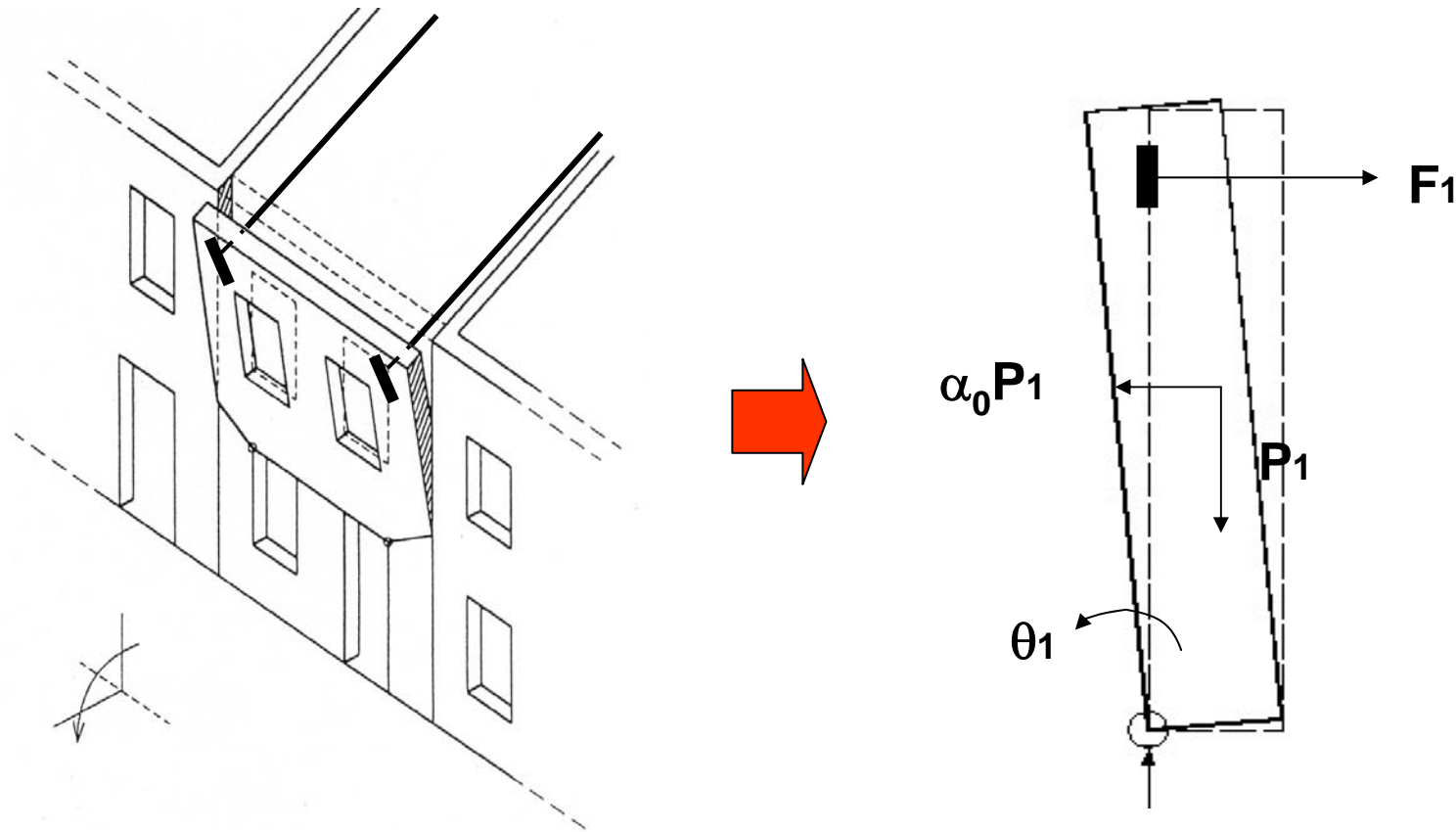
# FORZE DI ATTRITO



Attrito lungo i denti di distacco  
di una fessura

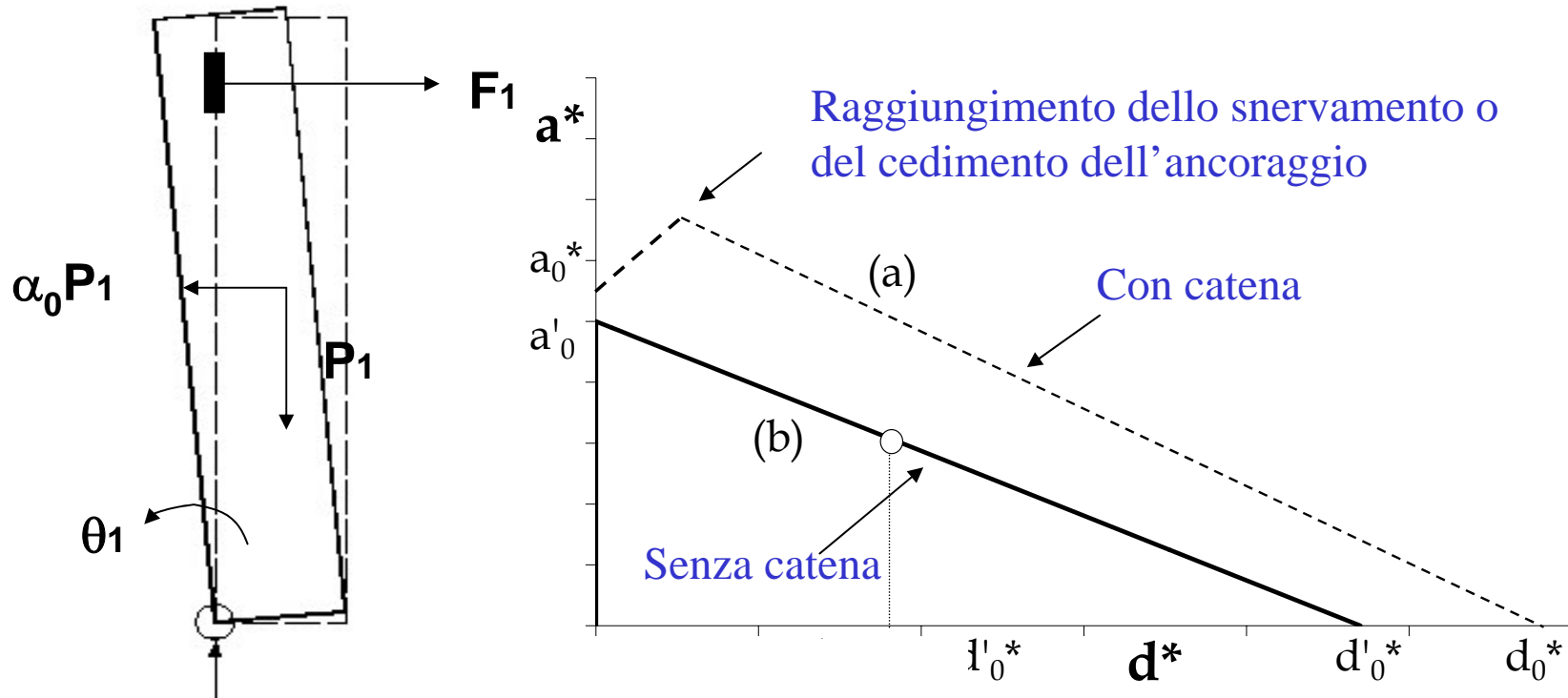
(De Felice and Giannini, 2001)

## Forze stabilizzanti da tiranti e catene



L'effetto di una catena può essere introdotto come una forza esterna il cui modulo dipende dallo spostamento.

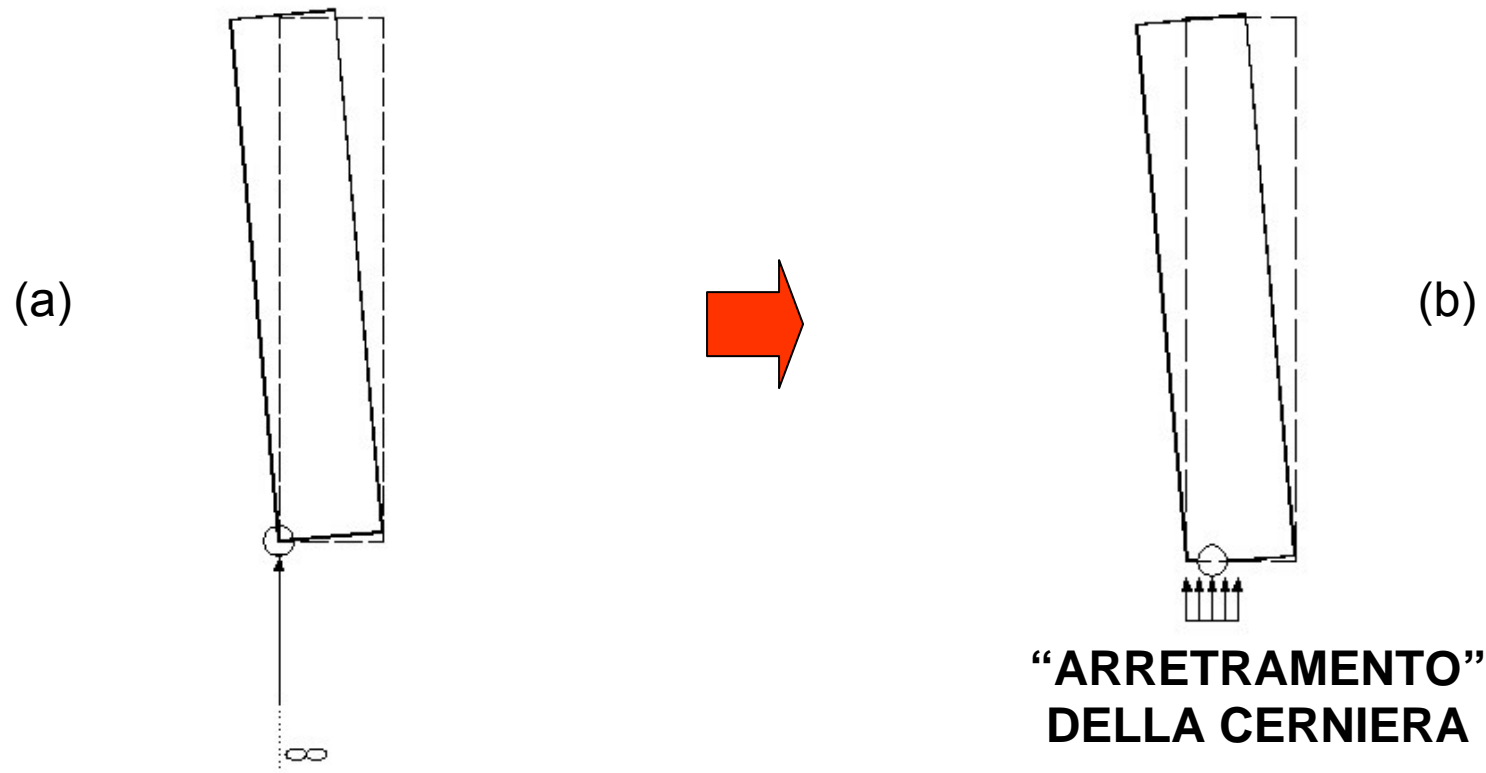
## Forze stabilizzanti da tiranti e catene



L'effetto di una catena può essere introdotto come una forza esterna il cui modulo dipende dallo spostamento.



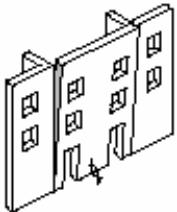
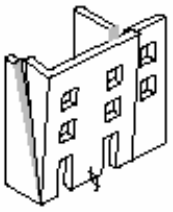
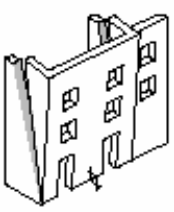
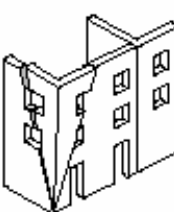
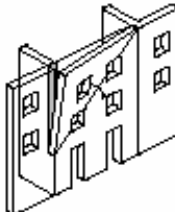
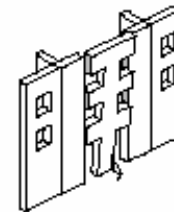
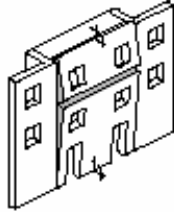
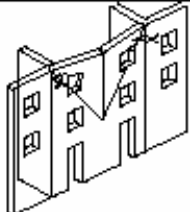
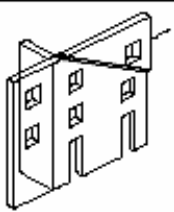
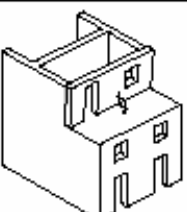
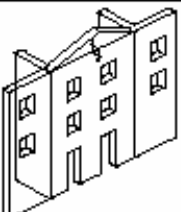


## Effetto della limitata resistenza a compressione



Ribaltamento:

- (a) Con resistenza a compressione infinita (elevata);
- (b) Con resistenza a compressione limitata (bassa): la risultante delle pressioni si sposta verso l'interno del muro

## Abaco di meccanismi locali

A	B1	B2	C	D	E	F
VERTICAL OVERTURNING	OVERTURNING WITH 1 SIDE WING	OVERTURNING WITH 2 SIDE WINGS	CORNER FAILURE	PARTIAL OVERTURNING	VERTICAL STRIP OVERTURNING	VERTICAL ARCH
						
		FURTHER PARTIAL FAILURES		ASSOCIATED FAILURES		
G	H	I	L			
HORIZONTAL ARCH	IN PLANE FAILURE	VERTICAL ADDITION	GABLE OVERTURNING	ROOF/FLOORS COLLAPSE	MASONRY FAILURE	
					 Insufficient cohesion in the fabric	

(D'Ayala & Speranza, 2002)

## Uso dell'analisi limite nella verifica sismica

- Le prime applicazioni venivano essenzialmente fatte con scopi comparativi per valutare quali parti della struttura erano le più vulnerabili, e per valutare l'effetto di tecniche di intervento (ad es. inserimento di catene, collegamenti...).
- In una strategia di miglioramento o adeguamento sismico, l'obiettivo è di avere moltiplicatori statici a collasso fuori dal piano che siano maggiori del coefficiente sismico globale dell'edificio (resistenza globale dell'edificio per azioni nel piano divisa per il peso dell'edificio).
- Un approccio più recente, proposto nella nuova normativa propone delle procedure di analisi statica equivalente che tengono conto, in modo approssimato, della natura dinamica della risposta.

## Uso dell'analisi limite nella verifica sismica

1. trasformazione di una parte della costruzione in un sistema labile (**catena cinematica**) a 1 g.d.l., attraverso l'individuazione di corpi rigidi, definiti da piani di frattura, in grado di ruotare o scorrere tra loro

2. valutazione del **moltiplicatore orizzontale dei carichi**  $\alpha_0$  che comporta l'attivazione del meccanismo (resistenza statica).

A tal fine, si applicano ai blocchi rigidi le seguenti forze:

- i **pesi propri dei blocchi**, applicati nel loro baricentro;
- i **carichi verticali** portati dagli stessi (pesi propri e sovraccarichi dei solai e della copertura, ecc);
- un sistema di **forze orizzontali** proporzionali ai carichi verticali portati, se queste non sono efficacemente trasmesse;
- eventuali **forze esterne** (ad es. catene metalliche);
- eventuali **forze interne** (ad es. ingranamento tra i conci murari).

## Applicazione del Principio dei Lavori Virtuali

Assegnata una **rotazione virtuale**  $\theta_k$  al generico blocco  $k$ , è possibile determinare gli **spostamenti** delle diverse forze nella rispettiva direzione.

Il valore di  $\alpha_0$  può essere ottenuto dal PLV, in termini di spostamenti:

$$\alpha_0 \left( \sum_{i=1}^n P_i \delta_{x,i} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j \delta_{x,j} \right) - \sum_{i=1}^n P_i \delta_{y,i} - \sum_{h=1}^o F_h \delta_h = L_{fi}$$

dove

$n$  è il numero di tutte le forze peso applicate ai diversi blocchi della catena cinematica;

$m$  è il numero di forze peso non direttamente gravanti sui blocchi le cui masse, per effetto dell'azione sismica, generano forze orizzontali sugli elementi della catena cinematica, in quanto non efficacemente trasmesse ad altre parti dell'edificio;

$o$  è il numero di forze esterne, non associate a masse, applicate ai diversi blocchi;

## Applicazione del Principio dei Lavori Virtuali

$$\alpha_0 \left( \sum_{i=1}^n P_i \delta_{x,i} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j \delta_{x,j} \right) - \sum_{i=1}^n P_i \delta_{y,i} - \sum_{h=1}^o F_h \delta_h = L_{fi}$$

$P_i$  è la generica forza peso applicata (peso proprio del blocco, applicato nel suo baricentro, o un altro peso portato);

$P_j$  è la generica forza peso, non direttamente applicata sui blocchi, la cui massa, per effetto dell'azione sismica, genera una forza orizzontale sugli elementi della catena cinematica, in quanto non efficacemente trasmessa ad altre parti dell'edificio;

$\delta_{x,i}$  è lo spostamento virtuale orizzontale del punto di applicazione dell' $i$ -esimo peso  $P_i$ , assumendo come verso positivo quello associato alla direzione secondo cui agisce l'azione sismica che attiva il meccanismo;

$\delta_{x,j}$  è lo spostamento virtuale orizzontale del punto di applicazione dell' $j$ -esimo peso  $P_j$ , assumendo come verso positivo quello associato alla direzione secondo cui agisce l'azione sismica che attiva il meccanismo;

$\delta_{y,i}$  è lo spostamento virtuale verticale del punto di applicazione dell' $i$ -esimo peso  $P_i$ , assunto positivo se verso l'alto;

$F_h$  è la generica forza esterna (in valore assoluto), applicata ad un blocco;

$\delta_h$  è lo spostamento virtuale del punto dove è applicata la  $h$ -esima forza esterna, nella direzione della stessa, di segno positivo se con verso discorde;

$L_{fi}$  è il lavoro di eventuali forze interne.

## Sistema equivalente a un grado di libertà

3. Definizione di un sistema equivalente a 1 g.d.l. con le seguenti caratteristiche:

$$M^* = \frac{\left( \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i} \right)^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2}$$

Massa  
partecipante

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 \sum_{i=1}^{n+m} P_i}{M^* FC} = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC}$$

Soglia di resistenza  
statica (accelerazione  
efficace)

$$e^* = gM^* / \sum_{i=1}^{n+m} P_i$$

Frazione di  
massa  
partecipante

## Verifiche di sicurezza: stato limite di danno (verifica “non richiesta”)

La verifica è soddisfatta qualora l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo sia superiore all'accelerazione di picco della domanda sismica.

Se la verifica riguarda una porzione di struttura sostanzialmente appoggiata a terra:

$$a_0^* \geq a_g (P_{V_{R(SLD)}}) \cdot S$$

Accel. al suolo su roccia,  
valutata per la probabilità  
di superamento dello SLD

Coeff. di sottosuolo



## Verifiche di sicurezza: stato limite di danno (verifica “non richiesta”)

Se la verifica riguarda una porzione di struttura posta ad una certa quota, si verifica anche che:

$$a_0^* \geq S_e(T_1) \cdot \psi(Z) \cdot \gamma$$

Coeff. di partecipazione modale del 1° modo

↓                                  ↓

Spettro di risp. elastico in accelerazione (SLD) valutato per  $T=T_1$           Prima forma modale normalizzata della struttura

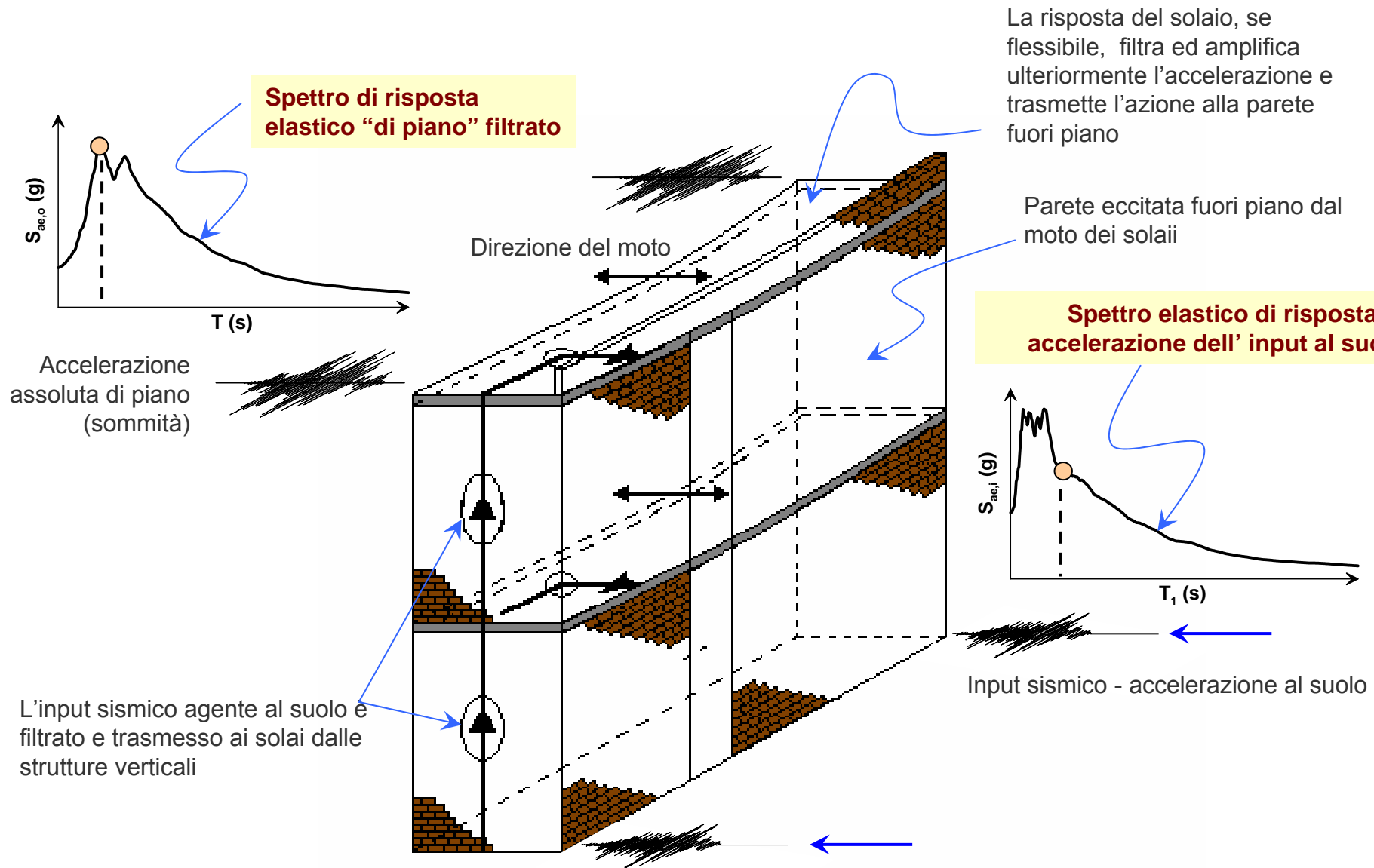
Z = altezza, rispetto alla fondazione dell'edificio del baricentro delle linee di vincolo tra i blocchi interessati dal meccanismo ed il resto della struttura

In assenza di valutazioni più accurate si può assumere:

$\psi(Z) = Z/H$  con H altezza dell'edificio

$\gamma = 3N/(2N+1)$  con N numero di piani dell'edificio

# Il "percorso dell'eccitazione sismica"



## Verifiche di sicurezza: s.l. di salvaguardia della vita (SLV)

4'. Verifica semplificata con fattore di struttura q (“**analisi cinematica lineare**”):

Se la verifica riguarda una porzione di struttura sostanzialmente appoggiata a terra:

$$a_0^* \geq \frac{a_g \left( P_{V_{R(SLV)}} \right) S}{q} \quad \text{con } q = 2.0$$

Se la verifica riguarda una porzione di struttura posta ad una certa quota, si verifica anche che:

$$a_0^* \geq \frac{S_e(T_1) \cdot \psi(Z) \cdot \gamma}{q}$$

dove i simboli hanno il significato già specificato

## Verifiche di sicurezza: s.l. di salvaguardia della vita (SLV)

4". Verifica mediante spettro di capacità (“**analisi cinematica non lineare**”). Consiste nel confronto tra capacità di spostamento e domanda di spostamento

4''a. Si calcola l'**evoluzione del moltiplicatore orizzontale dei carichi  $\alpha$**  al crescere dello spostamento  $d_k$  di un punto di controllo della catena cinematica, usualmente scelto in prossimità del baricentro, fino all'annullamento della forza sismica orizzontale.

Nota: quando le diverse azioni (forze peso, azioni esterne o interne) vengono mantenute costanti all'evolversi del cinematismo, **la curva è pressoché lineare**. In tal caso, in via semplificata, è sufficiente valutare lo spostamento  $d_{k,0}$  per cui si ha l'annullamento del moltiplicatore, e la curva assume la seguente espressione:

$$\alpha = \alpha_0 \left( 1 - d_k / d_{k,0} \right)$$

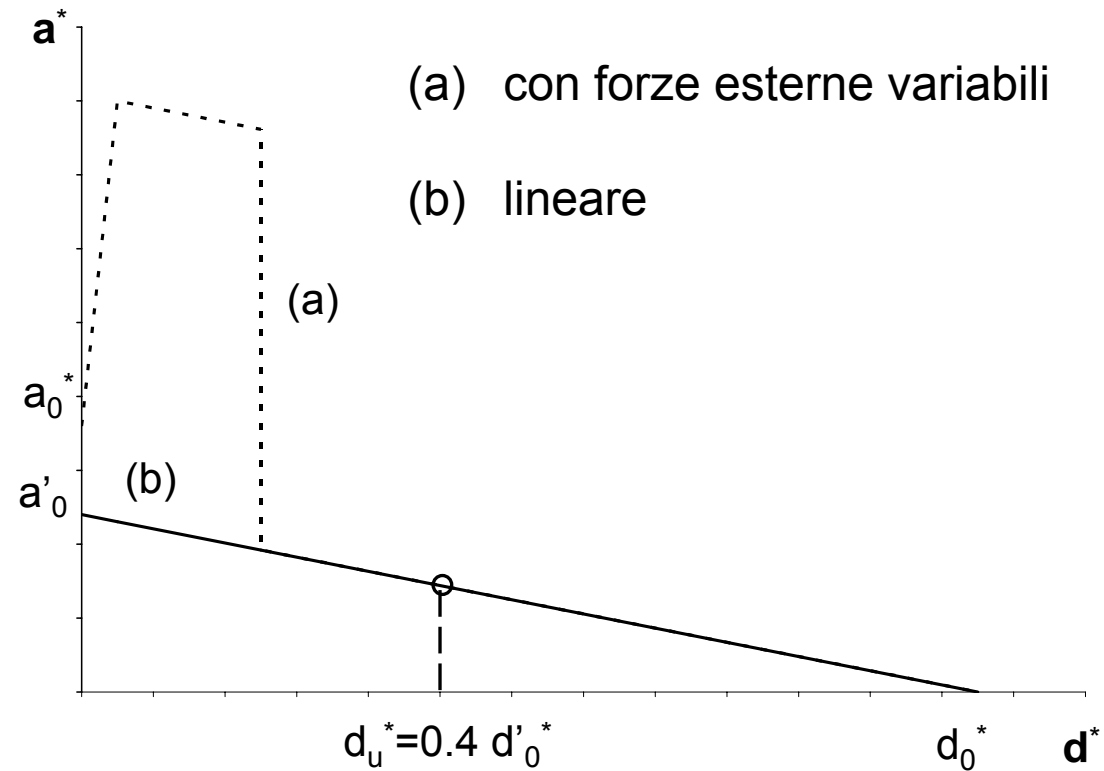
dove  $d_{k,0}$  è lo spostamento per cui il moltiplicatore  $\alpha$  si annulla.

## Curva di capacità del cinematismo

4''b. Si calcola lo spostamento del sistema equivalente a 1 g.d.l. come:

$$d^* = d_k \frac{\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2}{\delta_{x,k} \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}}$$

$$a^* = \frac{\alpha \sum_{i=1}^{n+m} P_i}{M^* \cdot FC} = \frac{\alpha g}{e^* \cdot FC}$$

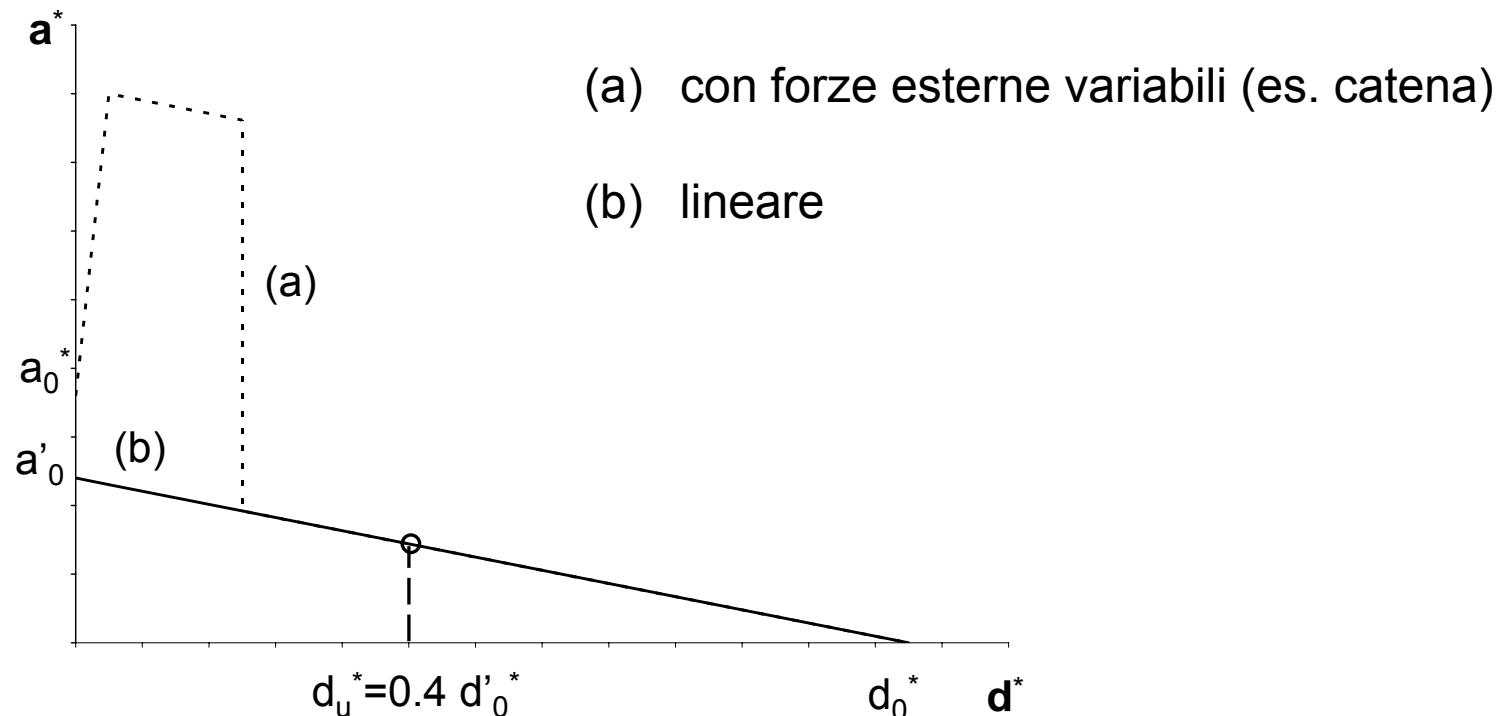


e si traccia la curva “di capacità”  $a^* - d^*$ .

## Spostamento ultimo

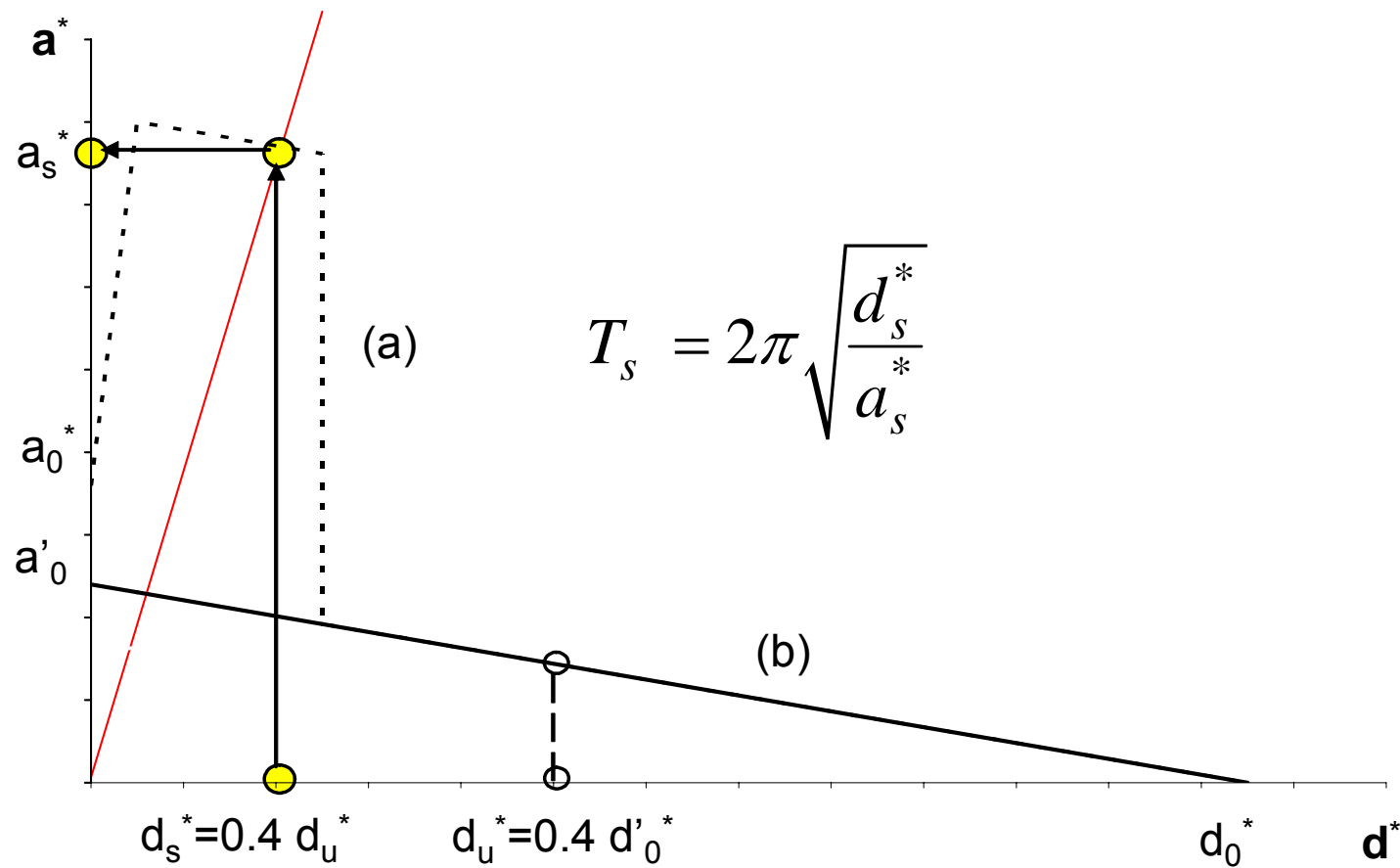
4''b. Lo spostamento ultimo  $d_u^*$  viene calcolato convenzionalmente come il minore tra:

- 40% dello spostamento  $d_0^*$  corrispondente all'annullamento di  $a^*$ .
- il limite di spostamento corrispondente a situazioni localmente incompatibili (ad es., sfilamento di travi), nei casi in cui questo sia valutabile.



## Periodo (secante) di vibrazione

4''c. Si definisce il periodo secante a  $0.4 d_u^*$  sulla curva di capacità:



## Domanda di spostamento

4''c. Si calcola la domanda di spostamento  $\Delta_d$  per  $T_s = T_s^*$  tramite il seguente spettro di risposta elastico in spostamento e la si confronta con la capacità di spostamento  $d_u^*$  del meccanismo:

$$\Delta_d = S_{De}(T_1) \cdot \psi(Z) \cdot \gamma \frac{\left(\frac{T_s}{T_1}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{T_s}{T_1}\right)^2 + 0.02 \frac{T_s}{T_1}}} \leq d_u^*$$

dove  $S_{De}(T_1)$  è lo spettro di risposta elastico in spostamento del moto del terreno, valutato in  $T_1$  (primo periodo di vibrazione dell'intera struttura nella direzione considerata) e tutti gli altri parametri hanno il significato già specificato. In ogni caso  $\Delta_d$  sarà assunto non minore di  $S_{De}(T_s)$



## 8.7.1 Costruzioni in muratura

.....

**L'analisi sismica globale** deve considerare, per quanto possibile, il sistema strutturale reale della costruzione, con particolare attenzione alla rigidezza e resistenza dei solai, e all'efficacia dei collegamenti degli elementi strutturali.

Nel caso di muratura irregolare, la resistenza a taglio di calcolo per azioni nel piano di un pannello in muratura potrà essere calcolata, facendo ricorso a **formulazioni alternative rispetto a quelle adottate per opere nuove**, purché di comprovata validità.

## C.8.7.1.1 Requisiti di sicurezza

.....

Quando la costruzione non manifesta un chiaro comportamento d'insieme, ma piuttosto tende a reagire al sisma come un insieme di sottosistemi (meccanismi locali), la verifica su un modello globale non ha rispondenza rispetto al suo effettivo comportamento sismico.

Particolarmente frequente è il caso delle grandi chiese o di edifici estesi e di geometria complessa non dotati di solai rigidi e resistenti nel piano, né di efficaci e diffusi sistemi di catene o tiranti.

In tali casi la verifica globale può essere effettuata attraverso un insieme esaustivo di verifiche locali, purché la totalità delle forze sismiche sia coerentemente ripartita sui meccanismi locali considerati e si tenga correttamente conto delle forze scambiate tra i sottosistemi strutturali considerati..

## C.8.7.1.2 Azione sismica

.....

Per la verifica di edifici con analisi lineare ed impiego del fattore  $q$ , il valore da utilizzare per quest'ultimo è pari a:

- $q = 2,0 \alpha_u/\alpha_1$  per edifici regolari in elevazione
- $q = 1,5 \alpha_u/\alpha_1$  negli altri casi

in cui  $\alpha_u$  e  $\alpha_1$  sono definiti al § 7.8.1.3 delle NTC. In assenza di più precise valutazioni, potrà essere assunto un rapporto  $\alpha_u/\alpha_1$  pari a 1,5.

La definizione di regolarità per un edificio esistente in muratura è quella indicata al § 7.2.2 delle NTC per i nuovi edifici, in cui il requisito d) (solai rigidi) è sostituito da: i solai sono ben collegati alle pareti e dotati di una sufficiente rigidezza e resistenza nel loro piano.

## C.8.7.1.4 Analisi sismica globale e criteri di verifica

.....

Possono essere usati i metodi descritti al §7.3 per i nuovi edifici. Per le costruzioni esistenti è possibile utilizzare l'analisi statica non lineare, indipendentemente dalla massa partecipante sul primo modo.

Vengono specificate le condizioni in cui nella modellazione possono essere considerate le travi di accoppiamento in muratura.

Vengono definiti i limiti di deformabilità dei pannelli murari relativamente agli stati limite SLO, SLD, SLV.

## C.8.7.1.5 Modelli di capacità per la valutazione

.....

Nel caso di analisi elastica con il fattore  $q$  (analisi lineare statica ed analisi dinamica modale con coefficiente di struttura), i valori di calcolo delle resistenze sono ottenuti dividendo i valori medi per i rispettivi fattori di confidenza (FC) e per il coefficiente parziale di sicurezza dei materiali ( $\gamma_m, \gamma_s, \gamma_c$  ...)

Nel caso di analisi non lineare, i valori di calcolo delle resistenze da utilizzare sono ottenuti dividendo i valori medi per i rispettivi fattori di confidenza.

## C.8.7.1.5 Modelli di capacità per la valutazione

Per gli edifici esistenti in muratura, considerata la notevole varietà delle tipologie e dei meccanismi di rottura del materiale, la resistenza a taglio di calcolo per azioni nel piano di un pannello in muratura potrà essere calcolata con un criterio di rottura per fessurazione diagonale o con un criterio di scorrimento, facendo eventualmente ricorso a formulazioni alternative rispetto a quelle adottate per opere nuove, purché di comprovata validità.

## C.8.7.1.5 Modelli di capacità per la valutazione

Nel caso di muratura irregolare o caratterizzata da blocchi non particolarmente resistenti, la resistenza a taglio di calcolo per azioni nel piano di un pannello in muratura potrà essere calcolata con la relazione seguente:

$$V_t = l \cdot t \frac{1.5\tau_{0d}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5\tau_{0d}}} = l \cdot t \frac{f_{td}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{td}}}$$

- $l$  è la lunghezza del pannello

- $t$  è lo spessore del pannello

- $\sigma_0$  è la tensione normale media, riferita all'area totale della sezione (=  $P/l$ , con  $P$  forza assiale agente positiva se di compressione)

- $f_{td}$  e  $\tau_{0d}$  sono rispettivamente i valori di calcolo della resistenza a trazione per fessurazione diagonale e della corrispondente resistenza a taglio di riferimento della muratura ( $f_t = 1.5 \tau_0$ )

- $b$  è un coefficiente correttivo legato alla distribuzione degli sforzi sulla sezione, dipendente dalla snellezza della parete. Si può assumere  $b = h/l$ , comunque non superiore a 1.5 e non inferiore a 1, dove  $h$  è l'altezza del pannello.

## C.8.7.1.5 Modelli di capacità per la valutazione

### **Solai**

È importante che la rigidezza e la resistenza di solai in ciascuna delle due direzioni sia correttamente valutata e considerata nel modello.

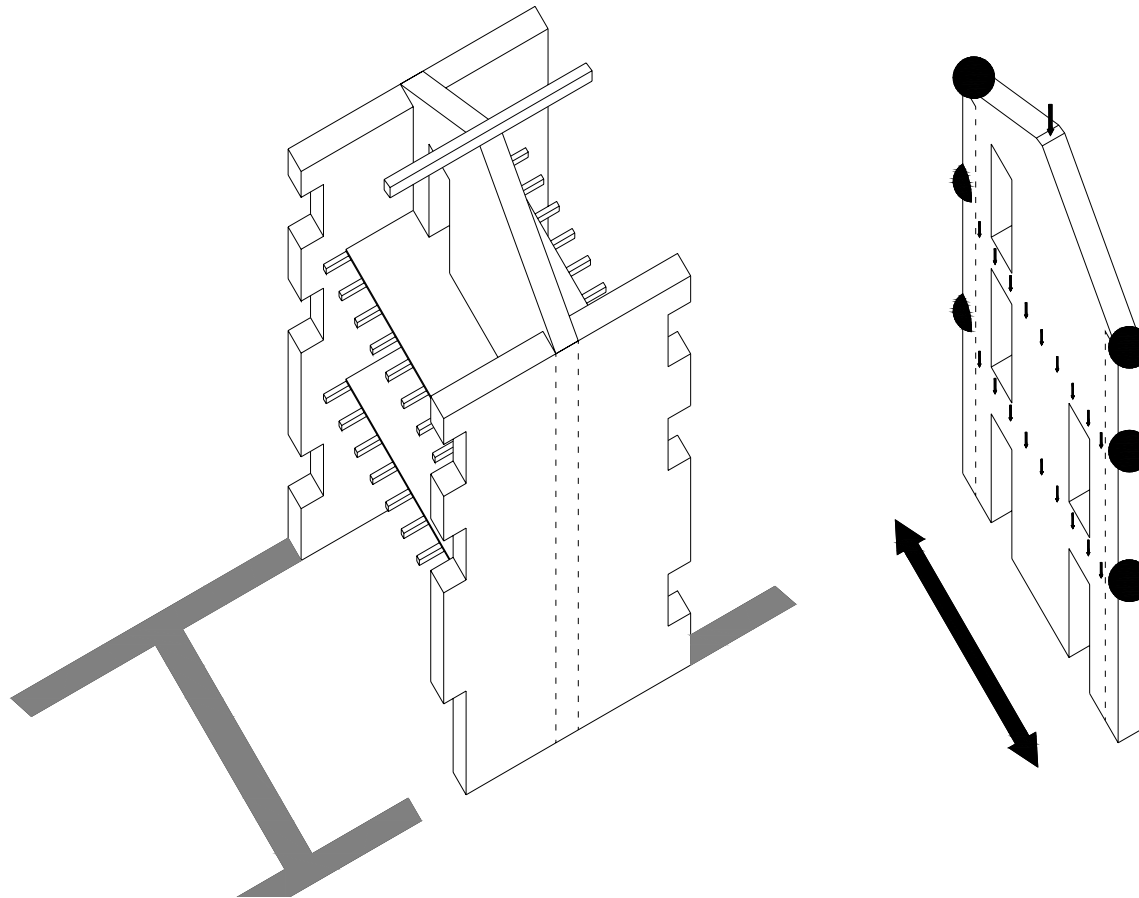
I solai potranno essere considerati infinitamente rigidi e resistenti nel caso in cui rispettino quanto indicato al § 7.2.6 delle NTC, salvo valutazioni più accurate da parte del progettista.



## 8.7.1 Costruzioni in muratura

.....

Qualora i **solai dell'edificio siano flessibili** si potrà procedere all'analisi delle singole pareti o dei sistemi di pareti complanari, ciascuna parete essendo soggetta ai carichi verticali di competenza ed alle corrispondenti azioni del sisma nella direzione parallela alla parete.



## 8.7.1 Costruzioni in muratura

.....

In presenza di **edifici in aggregato**, contigui, a contatto od interconnessi con edifici adiacenti, i metodi di verifica di uso generale per gli edifici di nuova costruzione possono non essere adeguati.

Nell'analisi di un edificio facente parte di un aggregato edilizio occorre tenere conto delle possibili interazioni derivanti dalla contiguità strutturale con gli edifici adiacenti. A tal fine dovrà essere individuata l'unità strutturale (US) oggetto di studio, evidenziando le azioni che su di essa possono derivare dalle unità strutturali contigue.

.....

### NTC § 8.7.1

...

In presenza di edifici in aggregato, contigui, a contatto od interconnessi con edifici adiacenti, **i metodi di verifica di uso generale per gli edifici di nuova costruzione possono non essere adeguati**. Nell'analisi di un edificio facente parte di un aggregato edilizio occorre tenere conto delle possibili interazioni derivanti dalla contiguità strutturale con gli edifici adiacenti. A tal fine dovrà essere individuata **l'unità strutturale (US)** oggetto di studio, evidenziando le azioni che su di essa possono derivare dalle unità strutturali contigue.

**L'US dovrà avere continuità da cielo a terra per quanto riguarda il flusso dei carichi verticali e, di norma, sarà delimitata o da spazi aperti, o da giunti strutturali, o da edifici contigui strutturalmente ma, almeno tipologicamente, diversi.** Oltre a quanto normalmente previsto per gli edifici non disposti in aggregato, dovranno essere valutati gli **effetti di: spinte non contrastate** causate da orizzontamenti sfalsati di quota sulle pareti in comune con le US adiacenti, **meccanismi locali** derivanti da prospetti non allineati, US adiacenti di **differente altezza**.

### Circolare § C8C

...

Tra le interazioni strutturali con gli edifici adiacenti si dovranno considerare:

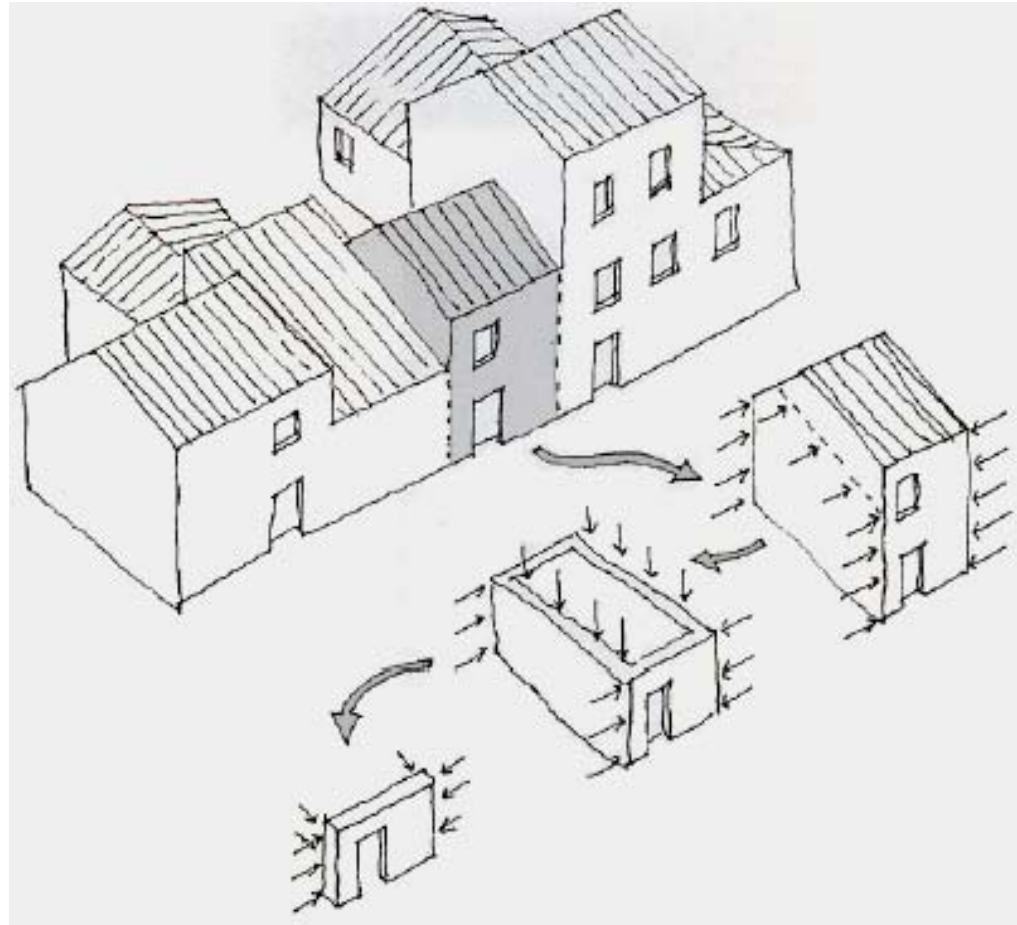
- carichi (sia verticali che orizzontali, in presenza di sisma) provenienti da solai o da pareti di US adiacenti;
- spinte di archi e volte appartenenti ad US contigue;
- spinte provenienti da archi di contrasto o da tiranti ancorati su altri edifici.

La rappresentazione dell'US attraverso piante, alzati e sezioni permetterà di valutare la diffusione delle sollecitazioni e l'interazione fra le US contigue. Oltre a quanto previsto per gli edifici isolati, dovranno essere valutati gli effetti di:

- spinte non contrastate causate da orizzontamenti sfalsati di quota sulle pareti in comune con le US adiacenti;
- effetti locali causati da prospetti non allineati, o da differenze di altezza o di rigidità tra US adiacenti,
- azioni di ribaltamento e di traslazione che interessano le pareti nelle US di testata delle tipologie seriali (schiere).
- il possibile martellamento nei giunti tra US adiacenti.

# Analisi del comportamento globale

Quando e come è possibile “estrarre” l’edificio (Unità Strutturale) dall’aggregato?



(Tocci e Carocci, 2006)

## Verifica globale semplificata per una US in un aggregato edilizio

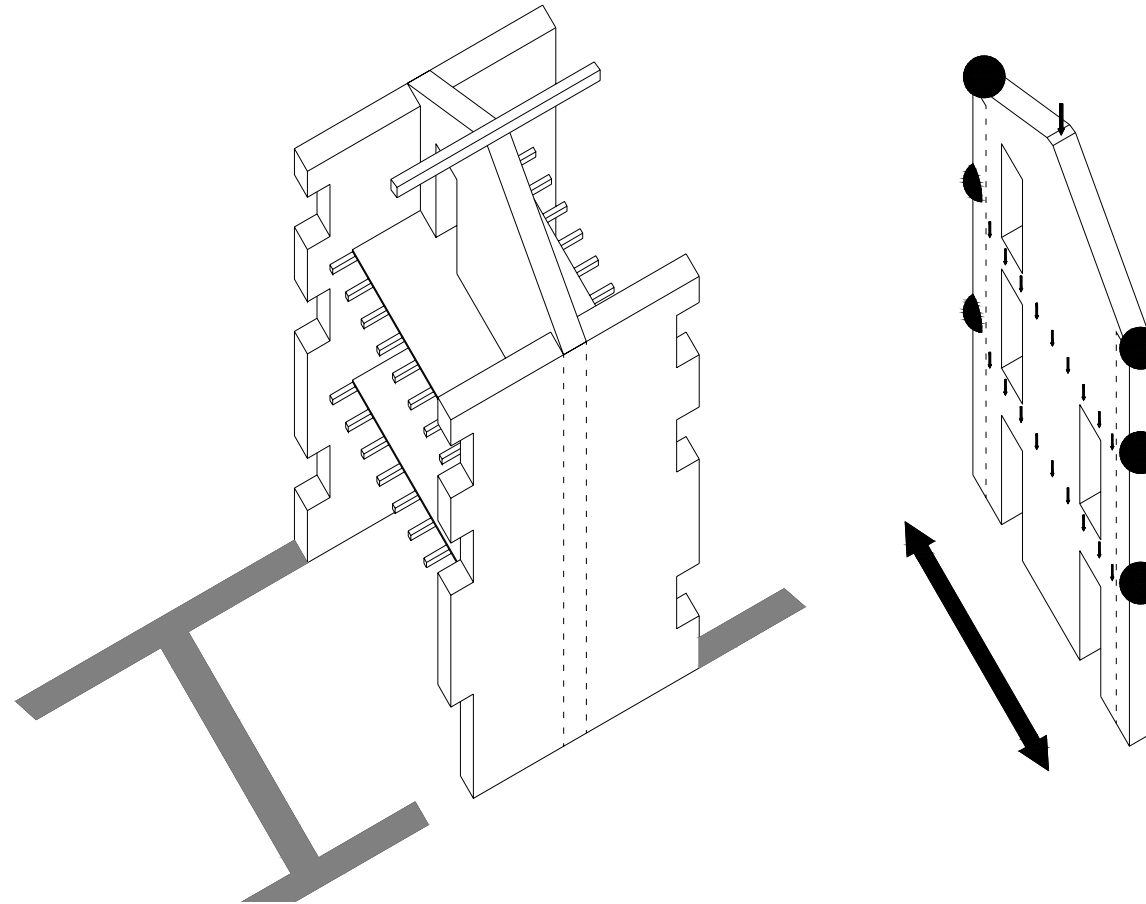
L'analisi globale di una singola unità strutturale assume spesso un significato convenzionale e perciò può utilizzare metodologie semplificate.

La verifica di una US dotata di *solai sufficientemente rigidi* può essere svolta, anche per edifici con più di due piani, mediante l'analisi statica non lineare, *analizzando* e verificando *separatamente ciascun interpiano* dell'edificio, e *trascurando la variazione della forza assiale* nei maschi murari dovuta all'effetto dell'azione sismica.

Con l'esclusione di unità strutturali d'angolo o di testata, così come di parti di edificio non vincolate o non aderenti su alcun lato ad altre unità strutturali, l'analisi potrà anche essere svolta trascurando gli effetti torsionali, nell'ipotesi che i solai possano unicamente traslare nella direzione considerata dell'azione sismica.

Nel caso invece di *US d'angolo o di testata* è comunque ammesso il ricorso ad analisi semplificate, purché si tenga conto di *possibili effetti torsionali e dell'azione aggiuntiva trasferita dalle US adiacenti applicando opportuni coefficienti maggiorativi delle azioni orizzontali.*

## Analisi del comportamento globale



**Qualora i solai dell'edificio siano flessibili si potrà procedere all'analisi delle singole pareti** o dei sistemi di pareti complanari, ciascuna parete essendo soggetta ai carichi verticali di competenza ed alle corrispondenti azioni del sisma nella direzione parallela alla parete.

## C8.7.1.7 Edifici semplici

È consentito applicare le **norme semplificate** di cui al § 7.8.1.9 delle NTC, utilizzando al posto della resistenza caratteristica a compressione  $f_k$  il valore medio  $f_m$ , diviso per il fattore di confidenza.

Oltre alle condizioni ivi prescritte, dopo l'eventuale intervento di adeguamento, è necessario che risulti verificato quanto segue:

- a) le pareti ortogonali siano tra loro ben collegate;
- b) i solai siano ben collegati alle pareti;
- c) tutte le aperture abbiano architravi dotate di resistenza flessionale;
- d) tutti gli elementi spingenti eventualmente presenti siano dotati di accorgimenti atti ad eliminare o equilibrare le spinte orizzontali;
- e) tutti gli elementi, anche non strutturali, ad elevata vulnerabilità siano stati eliminati;
- f) le murature non siano a sacco o a doppio paramento, ed in generale di cattiva qualità e scarsa resistenza (es. muratura in "foratoni", o con spessori chiaramente insufficienti).

.....



## 8.7.2 Costruzioni in cemento armato o acciaio

.....

## 8.7.3 Edifici misti

Alcune tipologie di edifici esistenti possono essere classificate come **miste**. Situazioni ricorrenti sono:

- edifici i cui muri perimetrali siano in muratura portante e la struttura verticale interna sia rappresentata da pilastri (per esempio, in c.a. o acciaio);
- edifici in muratura che abbiano subito sopraelevazioni, il cui sistema strutturale sia, per esempio, in c.a. o acciaio, o edifici in c.a. o acciaio sopraelevati in muratura;
- edifici che abbiano subito ampliamenti in pianta, il cui il sistema strutturale (per esempio, in c.a. o acciaio) sia interconnesso con quello esistente in muratura.

Per queste situazioni è necessario prevedere modellazioni che tengano in considerazione le particolarità strutturali identificate e l'interazione tra elementi strutturali di diverso materiale e rigidezza, ricorrendo, ove necessario, a metodi di analisi non lineare di comprovata validità.

## C8.7.3 Edifici misti

Gli edifici a struttura mista sono molto presenti nel panorama degli edifici esistenti, L'interpretazione del loro comportamento e la relativa modellazione è in generale più complicata di quella degli edifici con struttura di caratteristiche omogenee, a causa delle interazioni tra i diversi comportamenti dei materiali costitutivi degli elementi strutturali. La chiamata in causa dei comportamenti in campo non lineare implica interazioni non gestibili attraverso modelli e metodi semplificati, a meno di non trascurare completamente il contributo alla capacità resistente sismica di un'intera categoria di elementi dello stesso materiale, assunti come elementi secondari. Tale operazione, peraltro, è ammissibile solo a condizione che le interazioni degli elementi trascurati siano favorevoli al comportamento sismico della struttura mista.

## 8.7.4 Criteri e tipi di intervento

.....

## 8.7.5 Progetto dell'intervento

Per tutte le tipologie costruttive, il progetto dell'intervento di adeguamento o miglioramento sismico deve comprendere:

- verifica della struttura prima dell'intervento con identificazione delle carenze e del livello di azione sismica per la quale viene raggiunto lo SLU (e SLE se richiesto);
- scelta motivata del tipo di intervento;
- scelta delle tecniche e/o dei materiali;
- dimensionamento preliminare dei rinforzi e degli eventuali elementi strutturali aggiuntivi;
- analisi strutturale considerando le caratteristiche della struttura post-intervento;
- verifica della struttura post-intervento con determinazione del livello di azione sismica per la quale viene raggiunto lo SLU (e SLE se richiesto).

# ALLEGATO C8E – CRITERI PER GLI INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DI EDIFICI IN MURATURA

E' analogo all'allegato 11.E della OPCM 3274/3431, e fornisce critéri generali di guida agli interventi di consolidamento degli edifici in muratura, con riferimento ad alcune tecniche di utilizzo corrente.

Le indicazioni sono di carattere concettuale e non prescrittivo, e sono state redatte sulla base dello stato delle conoscenze e delle esperienze degli ultimi terremoti.

Le indicazioni non devono essere intese come un elenco di interventi da eseguire comunque e dovunque, ma solo come possibili soluzioni da adottare nei casi in cui siano dimostrate la carenza dello stato attuale del fabbricato ed il beneficio prodotto dall'intervento.

# **CRITERI PER GLI INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DI EDIFICI IN MURATURA**

**C8E.1 INTERVENTI VOLTI A RIDURRE LE CARENZE DEI COLLEGAMENTI**

**C8E.2 INTERVENTI SUGLI ARCHI E SULLE VOLTE**

**C8E.3 INTERVENTI VOLTI A RIDURRE L'ECCESSIVA DEFORMABILITÀ DEI SOLAI**

**C8E.4 INTERVENTI IN COPERTURA**

**C8E.5 INTERVENTI CHE MODIFICANO LA DISTRIBUZIONE DEGLI ELEMENTI VERTICALI RESISTENTI**

**C8E.6 INTERVENTI VOLTI AD INCREMENTARE LA RESISTENZA NEI MASCHI MURARI**

**C8E.7 INTERVENTI SU PILASTRI E COLONNE**

**C8E.8 INTERVENTI VOLTI A RINFORZARE LE PARETI INTORNO ALLE APERTURE**

**C8E.9 INTERVENTI ALLE SCALE**

**C8E.10 INTERVENTI VOLTI AD ASSICURARE I COLLEGAMENTI DEGLI ELEMENTI NON STRUTTURALI**

**C8E.11 INTERVENTI IN FONDAZIONE**

**C8E.12 REALIZZAZIONE DI GIUNTI SISMICI**