

Seminari di aggiornamento professionale  
“ANALISI E INTERVENTI  
STRUTTURALI SU EDIFICI VINCOLATI  
Parte 1”



Ordine degli Ingegneri  
della Provincia di Macerata  
Commissione Strutture e Geotecnica

# Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale la Direttiva P.C.M. 09/02/2011 ed il coordinamento con le NTC18

**Prof. Ing. Stefano Lenci**

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura (DICEA)*

*Università Politecnica delle Marche, Ancona*

[s.lenci@univpm.it](mailto:s.lenci@univpm.it)

*12 marzo 2021*



*Credits: Prof. Enrico Quagliarini, Prof. Francesco Clementi*



Emilia 2012





Emilia 2012



[19]



*Emilia 2012*

→ D. Lgs. n.42 del 22/01/2004, *Codice dei beni culturali e del paesaggio*

art. 29, comma 4:

“[...] Nel caso di beni immobili situati nelle zone dichiarate a rischio sismico in base alla normativa vigente, il restauro comprende l'**intervento di miglioramento strutturale**”

→ DPCM 26.02.2011, *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni*

→ D.M. 17.01.2018, Aggiornamento delle «*Nuove norme tecniche per le costruzioni*» (Capitolo 8)

→ Circ. min. n.7/2019, *Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018. (D.M. 14 gennaio 2008)* (Capitolo C8 e relative appendici)

## § C8.4

“Per gli interventi finalizzati alla riduzione della vulnerabilità sismica sui beni del patrimonio culturale vincolato, un opportuno riferimento è costituito dalla

*Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle nuove Norme tecniche per le costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008).*

Tale direttiva è adottabile per le costruzioni di valenza storico-artistica, anche se non vincolate”

## INDICE

<b>1</b>	<b>OGGETTO DELLA DIRETTIVA</b> .....	<b>6</b>	<b>CRITERI PER IL MIGLIORAMENTO SISMICO E TECNICHE DI INTERVENTO</b> .....
1.1	Finalità e criteri .....	6.1	Strategie per la scelta dell'intervento di miglioramento .....
1.2	Contenuti della Direttiva .....	6.2	Influenza degli interventi di adeguamento impiantistico .....
<b>2</b>	<b>REQUISITI DI SICUREZZA E CONSERVAZIONE</b> .....	6.3	Operazioni tecniche di intervento .....
2.1	Strumenti per la valutazione della sicurezza sismica a scala territoriale .....	6.3.1	<i>Premesse</i> .....
2.2	Criteri per la valutazione della sicurezza sismica e dell'efficacia dell'intervento .....	6.3.2	<i>Interventi volti a ridurre le carenze dei collegamenti</i> .....
2.3	Definizione di stati limite di riferimento per il patrimonio culturale .....	6.3.3	<i>Interventi volti a ridurre le spinte di archi e volte ed al loro consolidamento</i> .....
2.4	Livelli di sicurezza sismica .....	6.3.4	<i>Interventi volti a ridurre l'eccessiva deformabilità dei solai ed al loro consolidamento</i> ..
2.5	Modellazione strutturale, analisi sismica e progetto degli interventi per il miglioramento .....	6.3.5	<i>Interventi in copertura</i> .....
<b>3</b>	<b>AZIONE SISMICA</b> .....	6.3.6	<i>Interventi volti ad incrementare la resistenza degli elementi murari</i> .....
3.1	Effetti di sito .....	6.3.7	<i>Pilastrati e colonne</i> .....
3.2	Spettri di risposta .....	6.3.8	<i>Interventi su elementi non strutturali</i> .....
<b>4</b>	<b>CONOSCENZA DEL MANUFATTO</b> .....	6.3.9	<i>Interventi in fondazione</i> .....
4.1	Il percorso della conoscenza .....	<b>6.4</b>	<b>Operazioni progettuali</b> .....
4.1.1	<i>Generalità</i> .....	<b>7</b>	<b>QUADRO RIASSUNTIVO DEL PERCORSO DI VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA</b>
4.1.2	<i>Identificazione della costruzione</i> .....		<b>SISMICA E PROGETTO DEGLI INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO SISMICO</b> .....
4.1.3	<i>Caratterizzazione funzionale dell'edificio e dei suoi spazi</i> .....		Allegato A. Programma per il monitoraggio dello stato di conservazione dei beni architettonici
4.1.4	<i>Rilievo geometrico</i> .....		tutelati .....
4.1.5	<i>Analisi storica degli eventi e degli interventi subiti</i> .....		Allegato B. L'analisi strutturale delle costruzioni storiche in muratura.....
4.1.6	<i>Il rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione</i> .....		Allegato C. Modello per la valutazione della vulnerabilità sismica delle chiese .....
4.1.7	<i>La caratterizzazione meccanica dei materiali</i> .....		
4.1.8	<i>Aspetti geotecnici</i> .....		
4.1.9	<i>Monitoraggio</i> .....		
4.2	Livelli di conoscenza e fattori di confidenza .....		
<b>5</b>	<b>MODELLI PER LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA</b> .....		
5.1	Il comportamento sismico delle costruzioni storiche in muratura .....		
5.2	Metodi di analisi sismica .....		
5.2.1	<i>Premessa</i> .....		
5.2.2	<i>Analisi statica lineare</i> .....		
5.2.3	<i>Analisi dinamica modale</i> .....		
5.2.4	<i>Analisi statica non lineare</i> .....		
5.2.5	<i>Analisi dinamica non lineare</i> .....		
5.3	Livelli di valutazione della sicurezza sismica .....		
5.3.1	<i>LV1: analisi qualitativa e valutazione con modelli meccanici semplificati</i> .....		
5.3.2	<i>LV2: valutazione su singoli macroelementi (meccanismi locali di collasso)</i> .....		
5.3.3	<i>LV3: valutazione complessiva della risposta sismica del manufatto</i> .....		
5.4	Modelli di valutazione per tipologie.....		
5.4.1	<i>Premessa</i> .....		
5.4.2	<i>Palazzi, ville ed altre strutture con pareti di spina ed orizzontamenti intermedi</i> .....		
5.4.3	<i>Chiese, luoghi di culto ed altre strutture con grandi aule, senza orizzontamenti intermedi</i> .....		
5.4.4	<i>Torri, campanili ed altre strutture a prevalente sviluppo verticale</i> .....		
5.4.5	<i>Ponti in muratura, archi trionfali ed altre strutture ad arco</i> .....		

«La presente Direttiva è stata redatta con l'intento di specificare un percorso di **conoscenza**, **valutazione del livello di sicurezza** nei confronti delle azioni sismiche e progetto degli eventuali **interventi**,...»

«documento è riferito alle sole costruzioni in muratura»

«la vita nominale, introdotta nelle NTC, rappresenta quindi il parametro attraverso il quale programmare gli interventi di mitigazione del rischio»

«nel caso dei beni tutelati è comunque richiesta anche una valutazione della sicurezza complessiva, in forma semplificata»

«l'esperienza acquisita a seguito dei passati eventi sismici ha infatti mostrato come, per gli edifici storici in muratura, il collasso sia raggiunto, nella maggior parte dei casi, per perdita di equilibrio di porzioni limitate della costruzione, definite nel seguito macroelementi»

«per i beni culturali tutelati è possibile derogare rispetto all'adeguamento»

«Da questa impostazione risulta che spesso è opportuno accettare consapevolmente un livello di rischio sismico più elevato rispetto a quello delle strutture ordinarie, piuttosto che intervenire in modo contrario ai criteri di conservazione del patrimonio culturale»

«future verifiche che dovranno essere nuovamente eseguite entro la scadenza della vita nominale»

«garantire l'intervento per una vita nominale minore significa accettare di dover provvedere ad una nuova verifica entro tale termine, oltre a prevedere un idoneo programma di monitoraggio»

«l'esecuzione di una completa campagna di indagini può risultare troppo invasiva sulla fabbrica stessa»

«per la valutazione dei livelli di sicurezza sismica, la definizione di un definito programma di monitoraggio è fondamentale per garantire alla costruzione la vita nominale prevista»

«Allo stato attuale delle conoscenze, l'identificazione del danno sulla base di una variazione delle proprietà dinamiche è molto difficile»

«un ulteriore elemento di valutazione può essere il “collaudo” della storia, di cui l'esistenza stessa della costruzione ci fornisce testimonianza. Tale collaudo, tuttavia, risulta spesso insufficiente nei riguardi della prevenzione dal rischio sismico, in quanto una costruzione (pur se antica) potrebbe non essere ancora stata colpita da un terremoto di intensità pari a quella adottata dalle norme per valutare la sicurezza nei riguardi dello SLV»

«per valutare oggi la sicurezza di una costruzione esistente ... non si possa in ogni caso prescindere da una analisi strutturale, finalizzata a tradurre in termini meccanici e **quantitativi** il comportamento accertato nella costruzione»

«difficoltà di definire appropriate fattori di struttura» (di comportamento)

«un'analisi elastica lineare si riscontrano, generalmente, tensioni ... elevate ..., peraltro molto influenzate dalla discretizzazione adottata nel modello»

«è possibile utilizzare gli strumenti dell'analisi limite, in particolare nella forma del teorema cinematico»

«L'analisi dinamica modale ... la sua attendibilità nella valutazione del comportamento, in condizioni limite di resistenza, di antichi manufatti architettonici in muratura, è spesso limitata»

«L'analisi dinamica modale può essere utilizzata con maggiore confidenza in presenza di strutture flessibili e strutturalmente ben modellabili, come ad esempio le torri, i campanili»

«È quindi opportuno utilizzare questo metodo di analisi (dinamica non lineare, n.d.r.) solo in casi molto particolari, quando la complessità della struttura e l'importante contributo di diversi modi di vibrazione non consentono di ricondurre, con sufficiente attendibilità, la risposta sismica a quella di un sistema non lineare equivalente ad un solo grado di libertà.»

# VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

Nei confronti delle azioni sismiche gli stati limite, sia di esercizio che ultimi, sono individuati riferendosi alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti.

NTC 2018, § 3.2.1  
DPCM 9/02/2011, § 2.3

→ **SLU (Stati Limite Ultimi)**: motivati dalla volontà di salvaguardare la costruzione e l'incolumità degli occupanti nel caso di terremoti rari e di forte intensità.

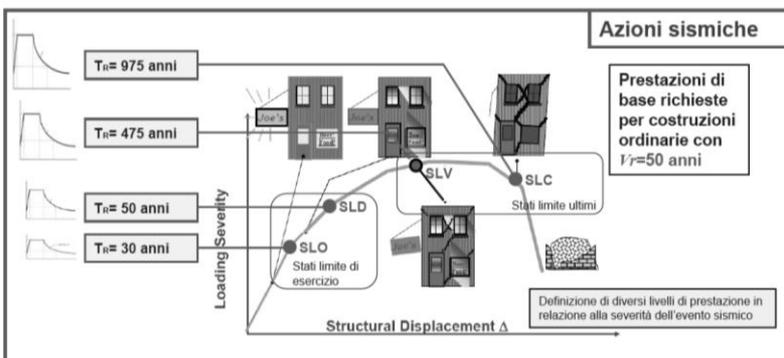
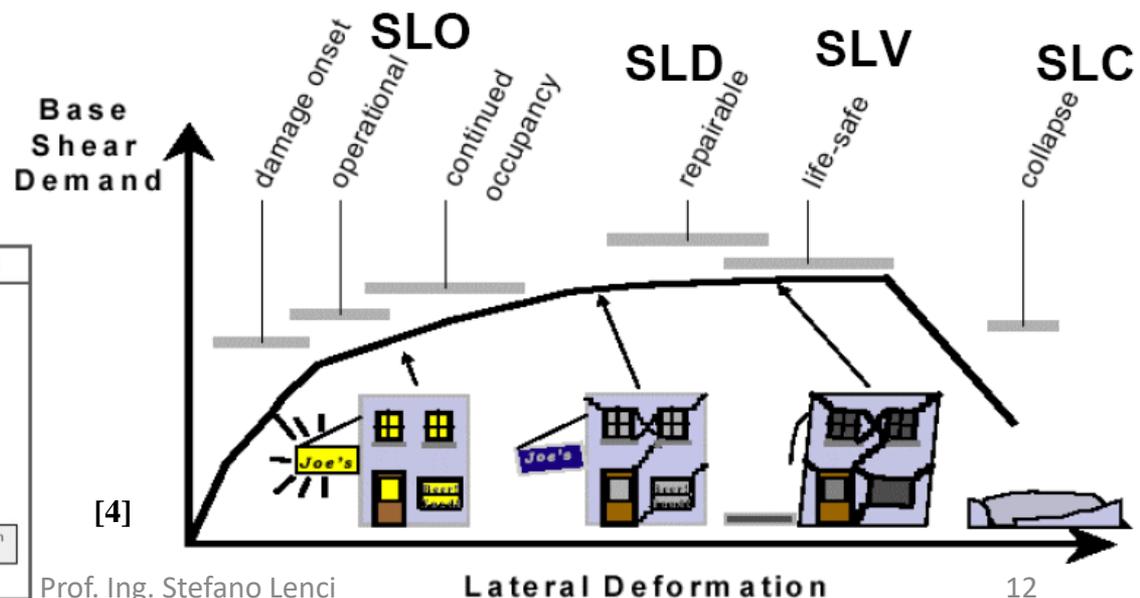
**SLV (Stato Limite di salvaguardia della Vita)**

**SLC (Stato Limite di Collasso)**

→ **SLE (Stati Limite di Esercizio)**: hanno l'obiettivo di limitare i danni per terremoti meno intensi ma più frequenti.

**SLO (Stato Limite di Operatività)**

**SLD (Stato Limite di Danno)**



# VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

Nei confronti delle azioni sismiche gli stati limite, sia di esercizio che ultimi, sono individuati riferendosi alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti.

NTC 2018, § 3.2.1  
DPCM 9/02/2011, § 2.3

→ **SLU (Stati Limite Ultimi)**: motivati dalla volontà di salvaguardare la costruzione e l'incolumità degli occupanti nel caso di terremoti rari e di forte intensità.

**SLV (Stato Limite di salvaguardia della Vita)**

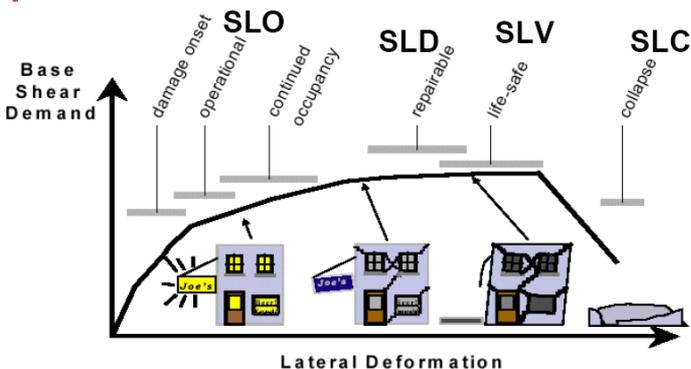
**SLC (Stato Limite di Collasso)**

**SL da considerare  
per i beni culturali**

→ **SLE (Stati Limite di Esercizio)**: hanno l'obiettivo di limitare i danni per terremoti meno intensi ma più frequenti.

**SLO (Stato Limite di Operatività)**

**SLD (Stato Limite di Danno)**



Prof. Ing. Stefano Lenci



L'Aquila 2009

# VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

---

Nei confronti delle azioni sismiche gli stati limite, sia di esercizio che ultimi, sono individuati riferendosi alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti.

NTC 2018, § 3.2.1  
DPCM 9/02/2011, § 2.3

- La valutazione nei riguardi dello **SLV** è richiesta per ciascun manufatto tutelato, anche se non soggetto a uso, in quanto garantisce non solo la salvaguardia degli occupanti ma anche la conservazione dello stesso manufatto.
- La valutazione nei riguardi dello **SLD** è richiesta, a livello complessivo, per i manufatti tutelati di cui si vuole sostanzialmente garantire la funzionalità dopo il terremoto, in relazione al loro uso.
- La valutazione nei riguardi dello **SLA** è richiesta, esclusivamente a livello locale, nelle parti della costruzione in cui sono presenti elementi di particolare valore artistico

## Per i beni culturali si introduce un altro SL

DPCM 9/02/2011, § 2.3

→ **SLA (Stati Limite di danno ai beni Artistici)**: introdotto per ragioni di tutela di specifiche opere d'arte

“A seguito di un terremoto di livello opportuno [...] i beni artistici contenuti nel manufatto, intesi come apparati decorativi, superfici pittoriche, elementi architettonici di pregio [...] nonché beni mobili pertinenziali [...] subiscono danni di modesta entità, tali da poter essere restaurati senza una significativa perdita di valore culturale.”

### ➤ **Danni agli apparati decorativi**

Significativi e non accettabili in presenza di danni gravi agli elementi strutturali (dipendenti dallo stato di danno della struttura nel suo complesso). Valutazione **SLA** con modelli di valutazione dello SLD precisando specifici valori per fessurazioni e deformazioni



Cornicioni

Rosoni



Volte in camorcanna

Stucchi



## Per i beni culturali si introduce un altro SL

DPCM 9/02/2011, § 2.3

→ **SLA (Stati Limite di danno ai beni Artistici)**: introdotto per ragioni di tutela di specifiche opere d'arte

“A seguito di un terremoto di livello opportuno [...] i beni artistici contenuti nel manufatto, intesi come apparati decorativi, superfici pittoriche, elementi architettonici di pregio [...] nonché beni mobili pertinenziali [...] subiscono danni di modesta entità, tali da poter essere restaurati senza una significativa perdita di valore culturale.”

### ➤ **Danni agli elementi di valore artistico costituenti singole parti della fabbrica**

Valutazione **SLA** eseguita solo in tali zone mediante modelli locali di parti strutturalmente autonome (indipendenti dallo stato di danno della struttura nel suo complesso).



Pinnacoli



Prof. Ing. Stefano Lenci



Vela campanaria

L'Aquila 2009

## Livelli di valutazione della sicurezza sismica

DPCM 9/02/2011, § 2.2

→ **LV1** – Valutazioni di sicurezza sismica da effettuarsi su scala territoriale su tutti i beni culturali tutelati. Utilizzo di metodi semplificati basati su un numero limitato di parametri geometrici e meccanici o che utilizzano dati qualitativi (interrogazione visiva, lettura dei caratteri costruttivi, rilievo critico e stratigrafico)

→ **LV2** – riparazione o intervento locale. Valutazioni da adottare in presenza di interventi locali su zone limitate della fabbrica, per le quali sono suggeriti metodi di analisi locale

*Comportano un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti.*

*Rientrano in questa tipologia tutti gli interventi di riparazione, rafforzamento o sostituzione di singoli elementi strutturali (travi, architravi, porzioni di solaio, pilastri, pannelli murari) o parti di essi, non adeguati alla funzione strutturale che debbono svolgere, a condizione che l'intervento non cambi significativamente il comportamento globale della struttura, soprattutto ai fini della resistenza alle azioni sismiche, a causa di una variazione non trascurabile di rigidità e di peso.*

NTC 2018, § 8.4.1  
Circolare n.17/2019, § C8.4.1

→ **LV3** – intervento di miglioramento. Progetto di interventi diffusi nella costruzione, che per quanto possibile non dovrebbero modificare il funzionamento strutturale accertato attraverso il percorso della conoscenza.

*Finalizzati ad accrescere la capacità di resistenza delle strutture esistenti alle azioni considerate.*

*Ricadono in questa categoria tutti gli interventi che fanno variare significativamente la rigidità, la resistenza e/o la duttilità dei singoli elementi o parti strutturali e/o introducono nuovi elementi strutturali, così che il comportamento strutturale locale o globale, particolarmente rispetto alle azioni sismiche, ne sia significativamente modificato. Ovviamente la variazione dovrà avvenire in senso migliorativo, ad esempio impegnando maggiormente gli elementi più resistenti, riducendo le irregolarità in pianta e in elevazione, trasformando i meccanismi di collasso da fragili a duttili.*

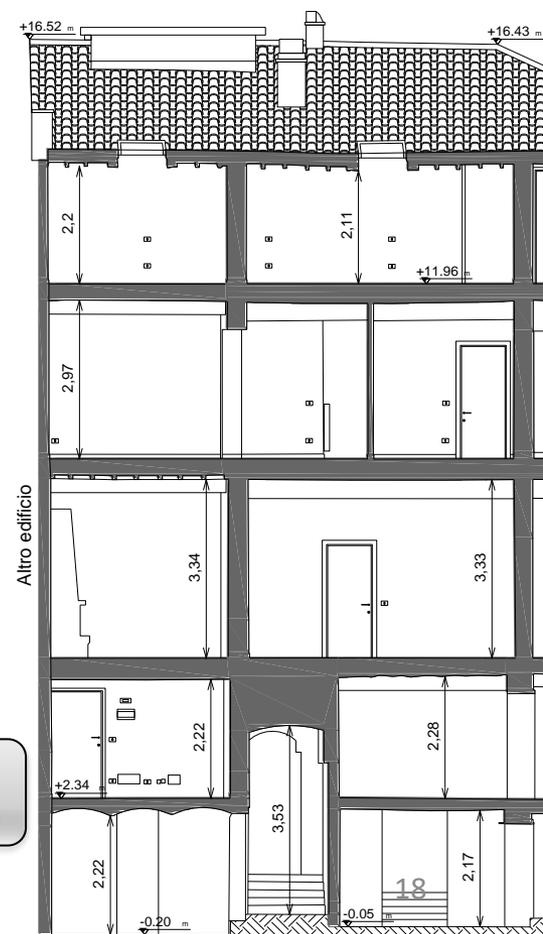
NTC 2018, § 8.4.2  
Circolare n.17/2019, § C8.4.2

- **Identificazione della costruzione:** primo rilievo schematico con ipotesi delle fasi costruttive
- **Caratterizzazione funzionale dell'edificio e dei suoi spazi:** riconoscere le utilizzazioni succedute nel tempo e in quali ambienti
- **Rilievo geometrico:** necessario per definire la geometria del modello da utilizzare nell'analisi sismica
- **Analisi storica degli eventi e degli interventi subiti**
- **Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione**
- **Caratterizzazione meccanica dei materiali**



VULNERABILITA' SPECIFICHE

Piante + prospetti + sezioni +  
particolari costruttivi di dettaglio



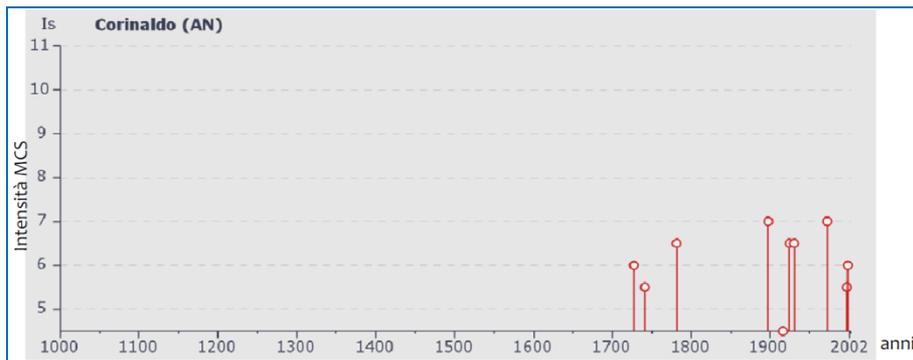
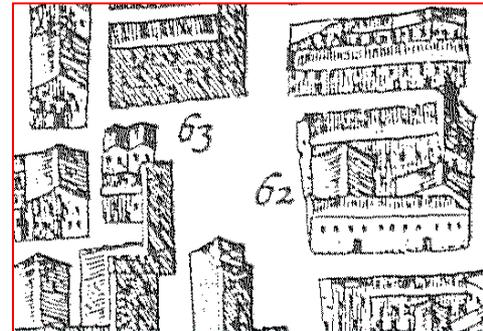
## Analisi storica degli eventi e degli interventi subiti

Fondamentale per l'individuazione del reale sistema resistente e del suo stato di sollecitazione. Definizione dei meccanismi di danno critici e di modelli di calcolo attendibili.

Documentazione di archivio

Sismicità storica (cataloghi sismici)

Monumento-Documento



Cronologia e intensità al sito dei terremoti localizzati nel territorio



## Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione

### Qualità del collegamento tra pareti verticali



Assenza connessione



[6]



## Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione

### Discontinuità murarie

[19]



## Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione

### Conoscenza delle tecniche costruttive

#### La muratura esistente

- Qualità dei materiali costituenti
- Tessitura e dimensione degli elementi
- Composizione trasversale
- Dettagli (ad esempio scaglie e listature)

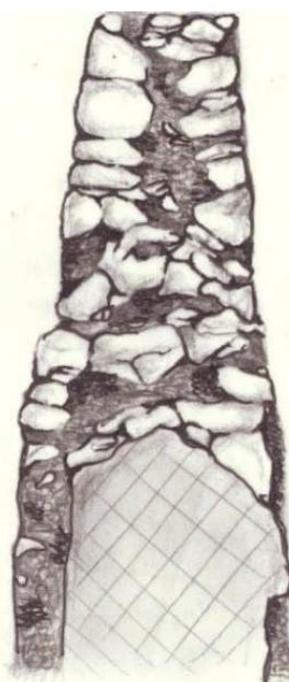


## Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione

### Conoscenza delle tecniche costruttive

#### La muratura esistente

- la qualità dei materiali (pietre, mattoni, malta)
- la dimensione e la forma degli elementi
- la tessitura dei paramenti esterni
- **le connessioni trasversali**

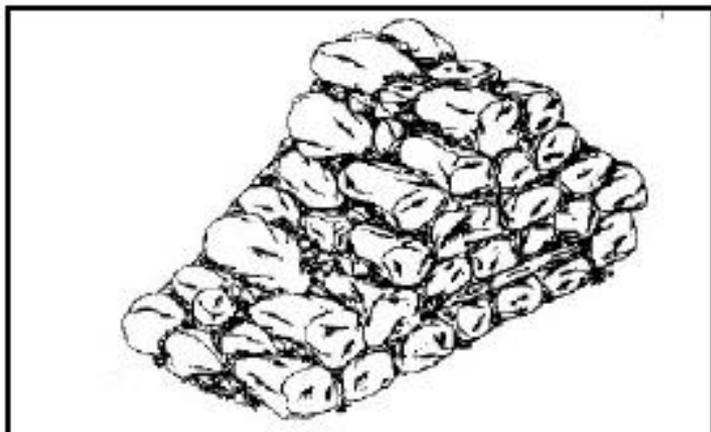


Prof. Ing. Stefano Lenci



## Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione

### Conoscenza delle tecniche costruttive



**DESCRIZIONE:**

Costituita da ciottoli di fiume di piccole e medie dimensioni senza ricorsi.



**DESCRIZIONE:**

Costituita da ciottoli di fiume di medie dimensioni senza ricorsi, grossolanamente lavorata.

[7]

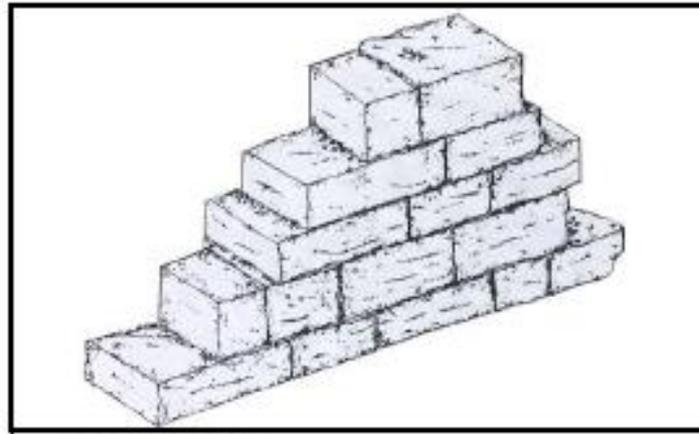
### Apparecchiatura muraria: muratura in pietra arrotondata e ciottoli

## Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione

### Conoscenza delle tecniche costruttive



**DESCRIZIONE:**  
Costituita da elementi omogenei in pietra naturale ben squadrata e lavorata, di accurata fattura.

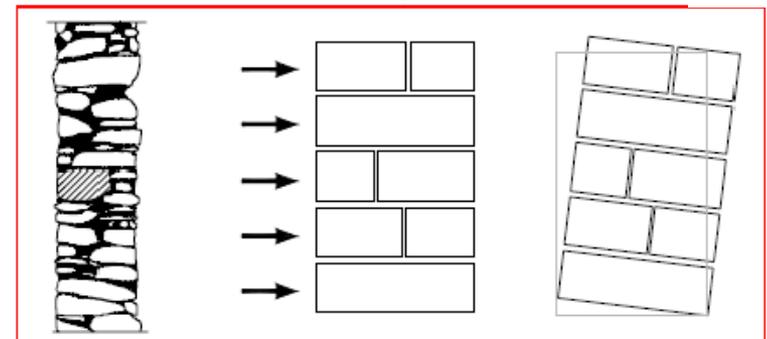


**DESCRIZIONE:**  
Costituita da elementi omogenei in pietra naturale ben squadrata e lavorata, di accurata fattura.

[7]

### Apparecchiatura muraria: muratura in pietra squadrata

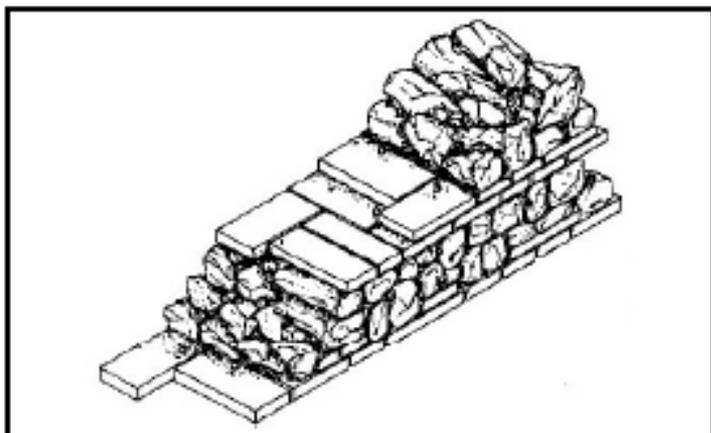
#### Comportamento monolitico



[9]

## Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione

### Conoscenza delle tecniche costruttive



**DESCRIZIONE:**

Sezione muraria con ricorsi in pietra squadrata o mattoni pieni che attraversano tutto lo spessore murario.



**DESCRIZIONE:**

Presenza di ricorsi continui o discontinui in mattoni pieni, in presenza di pietrame discretamente squadrato.

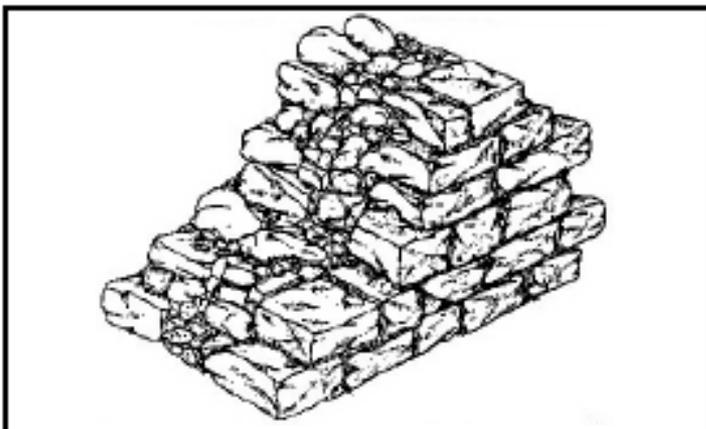
[7]

### Apparecchiatura muraria: muratura listata

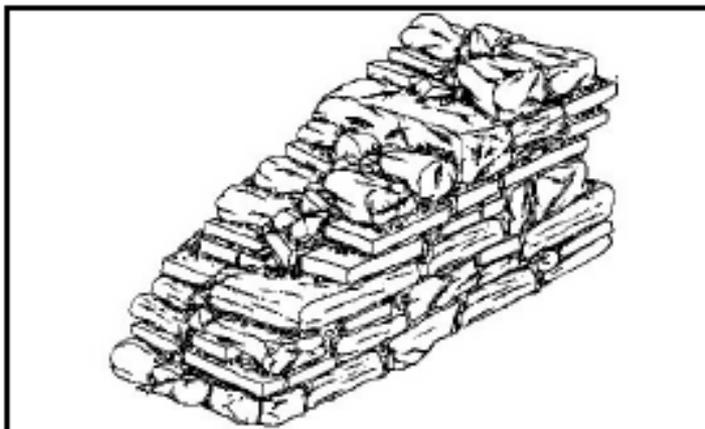
NTC 2018, § 8.5.2  
Circolare n.17/2019, § C8.5.2  
DPCM 9/02/2011, § 4.1

## Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione

### Conoscenza delle tecniche costruttive



**DESCRIZIONE:**  
Sezione muraria con nucleo incoerente priva di elementi di collegamento (diatoni) tra i due paramenti.

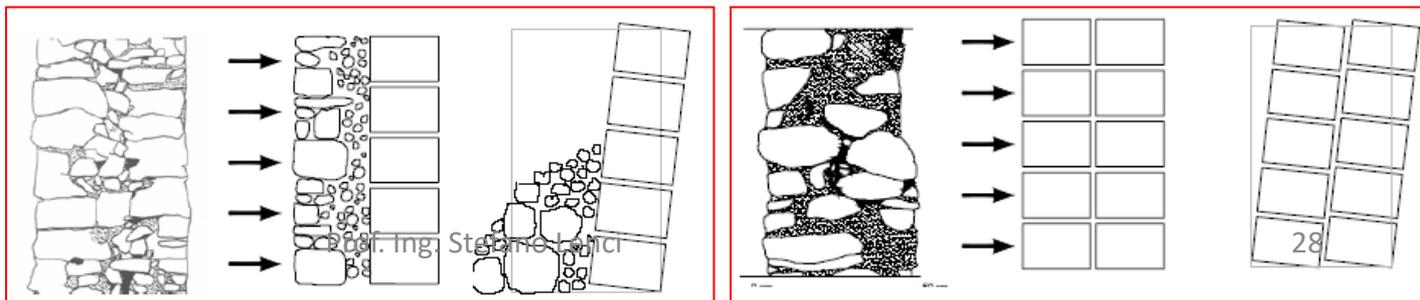


**DESCRIZIONE:**  
Sezione muraria con ricorsi in pietra squadrata o mattoni pieni che non attraversano tutto lo spessore murario.

[7]

### Apparecchiatura muraria: muratura a sacco

### Comportamento indipendente tra i due paramenti

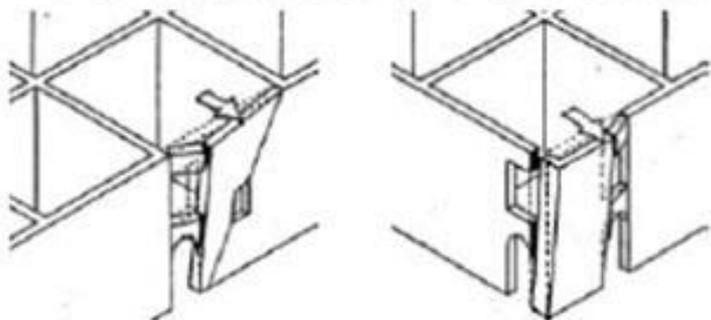


[9]

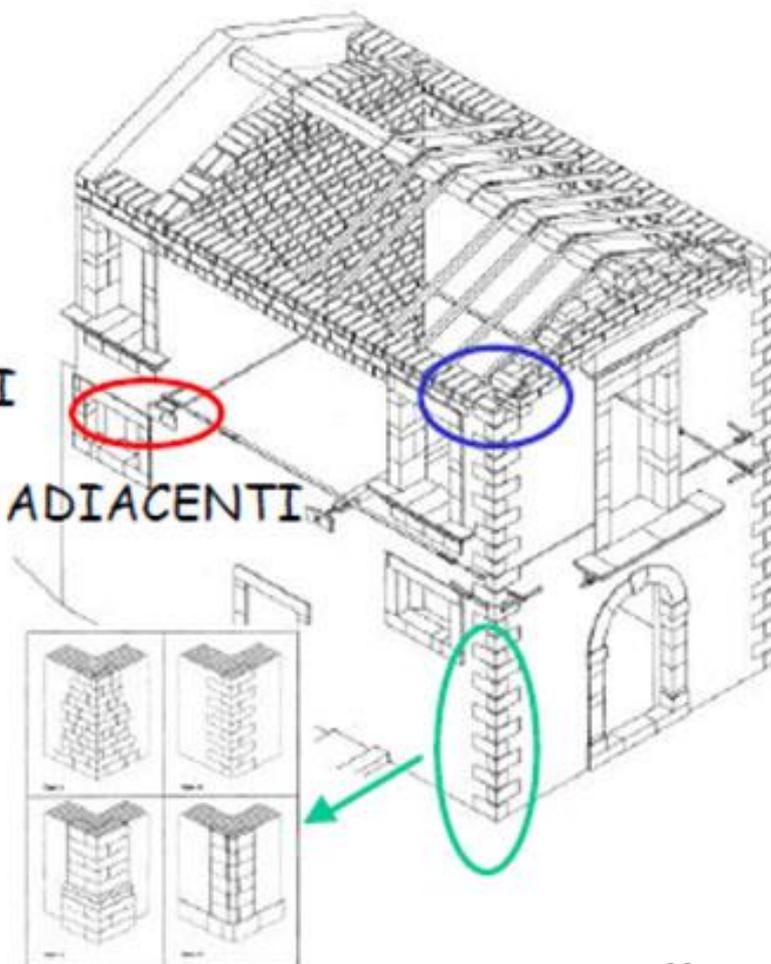
## Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione

### Conoscenza delle tecniche costruttive

- EFFICACIA DEI COLLEGAMENTI CON ALTRI ELEMENTI
- PRESENZA DI COLLEGAMENTI PUNTUALI
- CONNESSIONI CON CORPI DI FABBRICA ADIACENTI



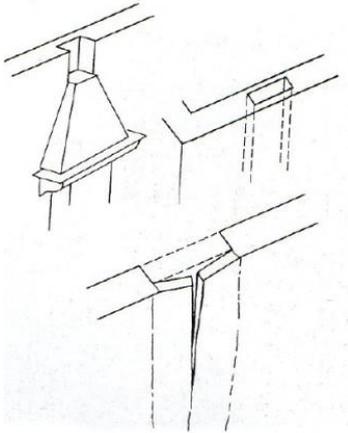
- EFFICACIA DEI CANTONALI



## Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione

### Conoscenza delle tecniche costruttive

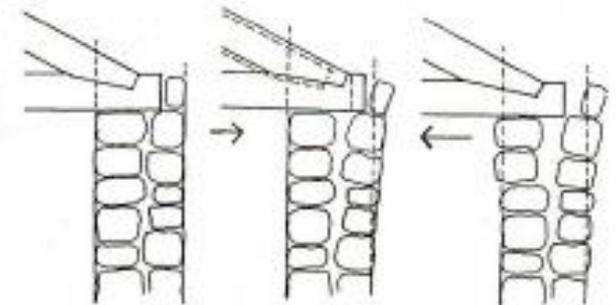
### Elementi che riducono la sezione muraria



[3]

Prof. Ing. Stefano Lenci

### Coperture appoggiate su un solo paramento murario



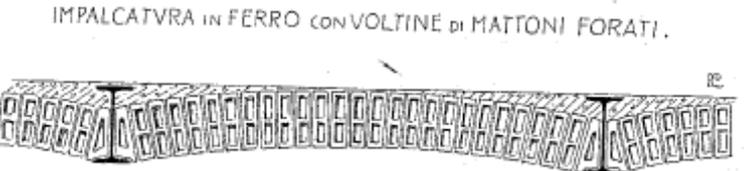
30

NTC 2018, § 8.5.2  
Circolare n.17/2019, § C8.5.2  
DPCM 9/02/2011, § 4.1

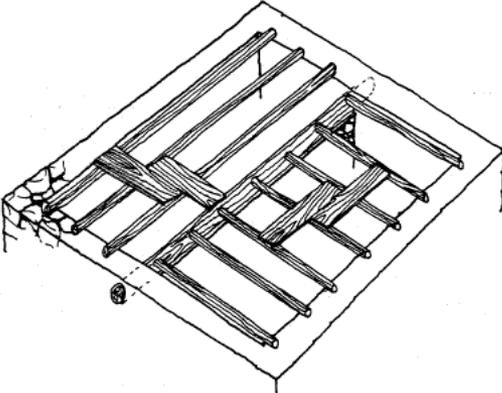
## Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione

### Conoscenza delle tecniche costruttive

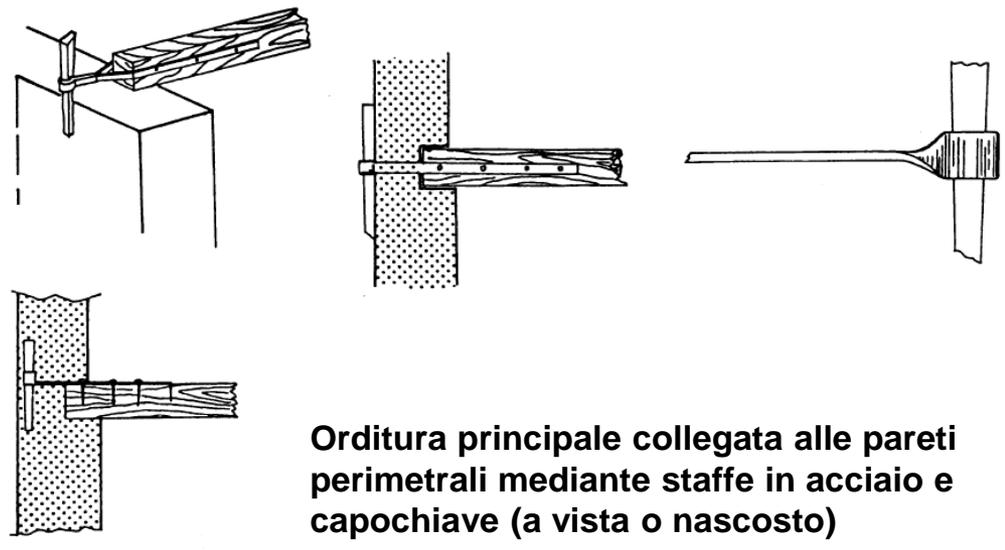
#### Solai



Solaio che crea una spinta localizzata nella muratura



Solaio in legno a doppia orditura:  
assenza di vincoli con le pareti



Orditura principale collegata alle pareti perimetrali mediante staffe in acciaio e capochiave (a vista o nascosto)

Diversa orditura delle travi: si potrebbe verificare un crollo parziale dell'impalcato per fuoriuscita delle dalla loro sede di appoggio

## Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione

### Conoscenza delle tecniche costruttive

#### Solai



**Fondamentali sono le informazioni sulla localizzazione dei materiali e la stratificazione degli elementi strutturali seguendo simbologie opportune.**

NTC 2018, § 8.5.2  
Circolare n.17/2019, § C8.5.2  
DPCM 9/02/2011, § 4.1

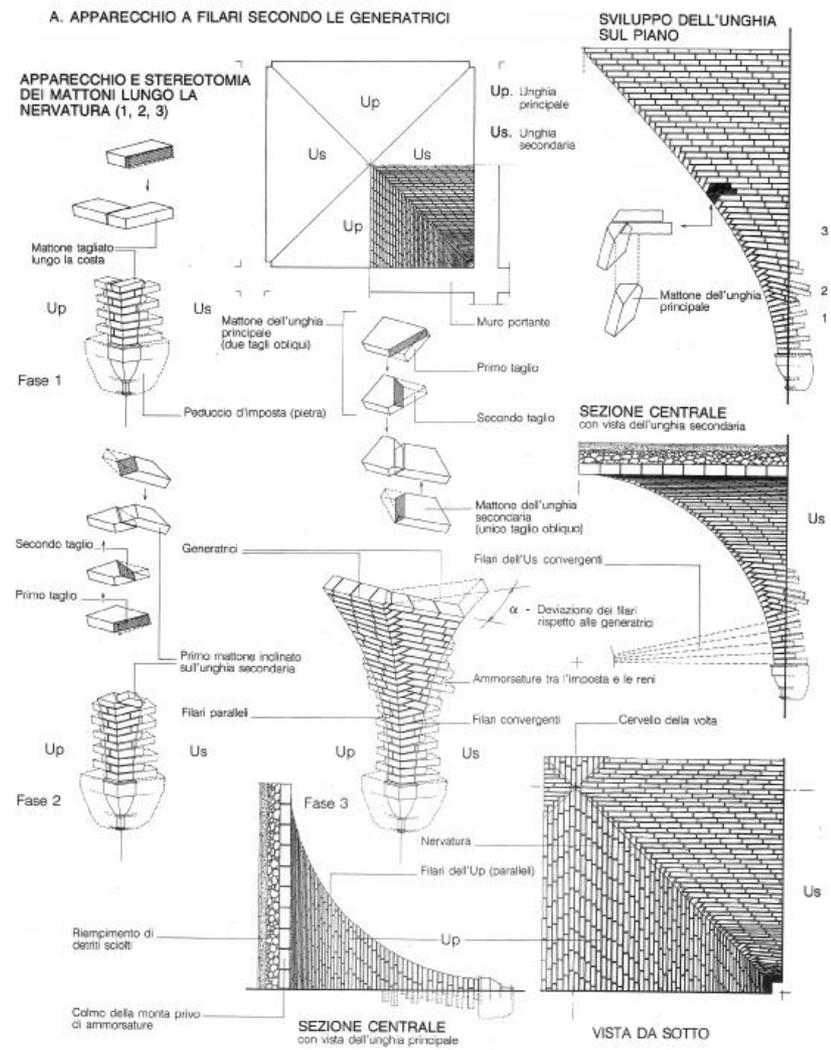
## Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione

### Conoscenza delle tecniche costruttive

### Archi e volte



[8]

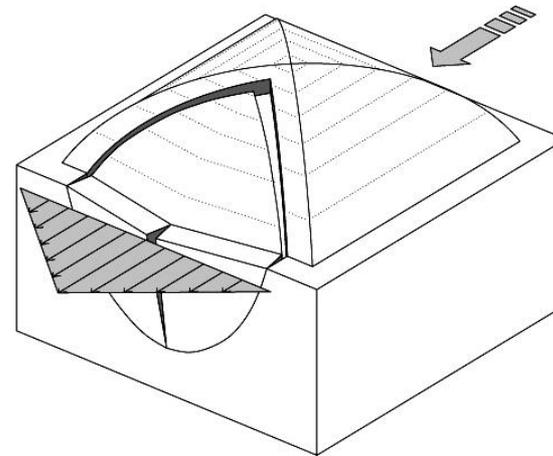
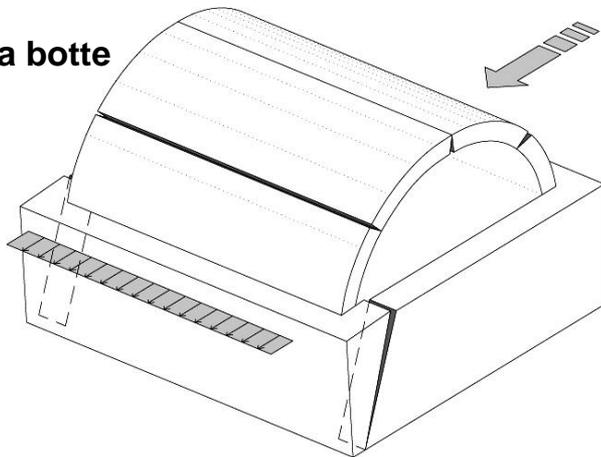


## Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione

### Conoscenza delle tecniche costruttive

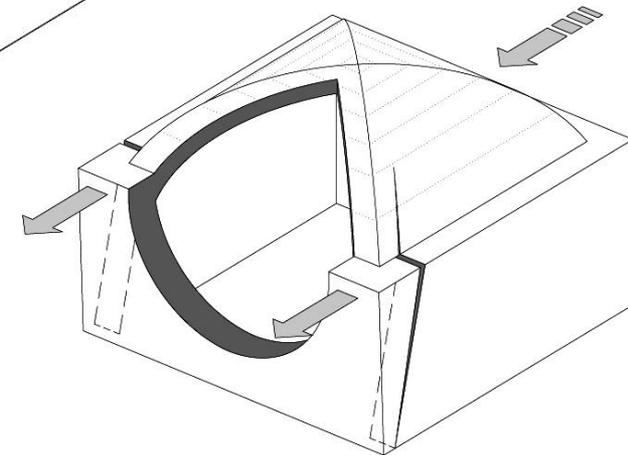
#### Archi e volte

Volta a botte

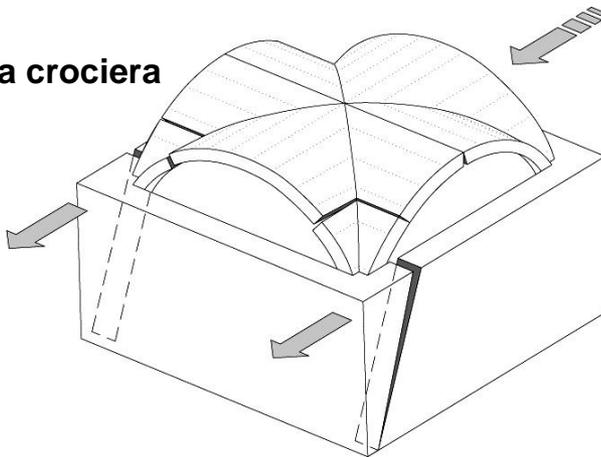


[8]

Volta a padiglione



Volta a crociera



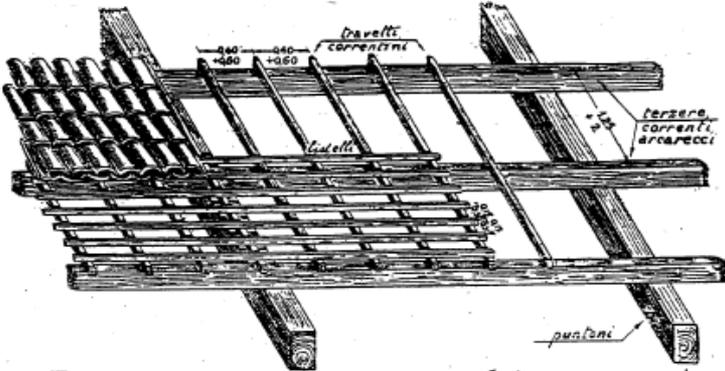
**Comportamento della struttura  
spingente in caso di sisma**

NTC 2018, § 8.5.2  
Circolare n.17/2019, § C8.5.2  
DPCM 9/02/2011, § 4.1

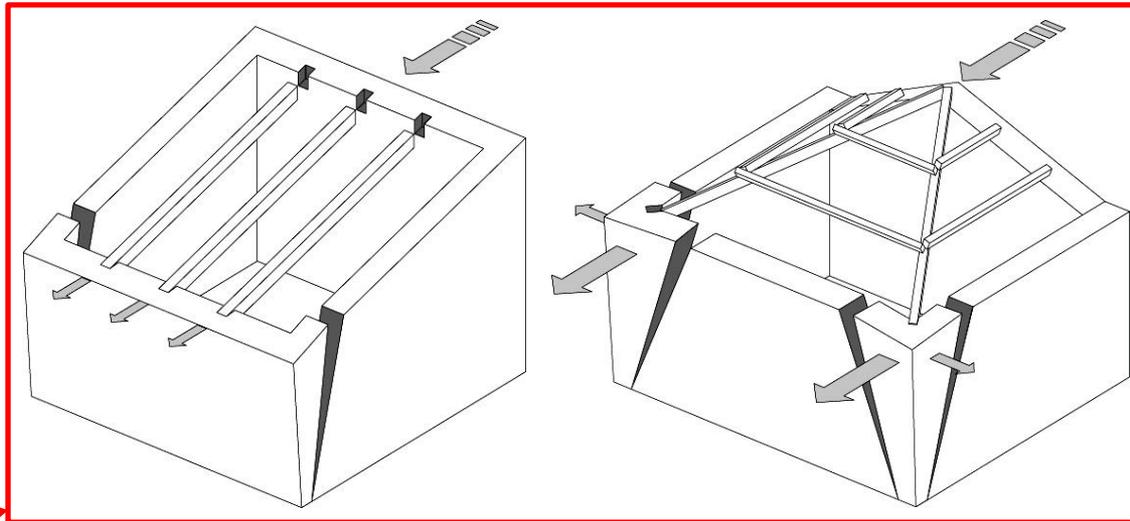
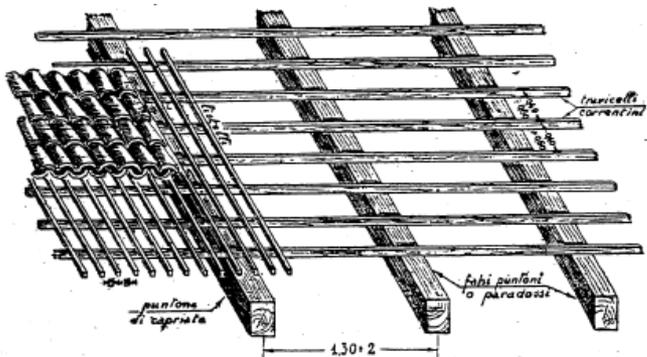
## Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione

### Conoscenza delle tecniche costruttive

#### Coperture



Alla lombarda – non spingente  
Orditura portante costituita da capriate



Alla piemontese – «spingente»  
Orditura portante costituita da puntoni

## Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione

Deve consentire una completa individuazione degli elementi resistenti della fabbrica, tenendo in considerazione la qualità e lo stato di conservazione dei materiali e degli elementi costruttivi

### Degrado della muratura

- 1) Perdita legante tra i giunti
- 2) Decoesione muraria
- 3) Presenza di acqua

### Degrado degli elementi lignei

- 1) Immarcimento delle teste
- 2) Inflessione degli elementi

### Mancata manutenzione

- 1) Stato del paramento a vista
- 2) Stato del manto di copertura
- 3) Gronde non sufficienti
- 4) Efficienza degli intonaci

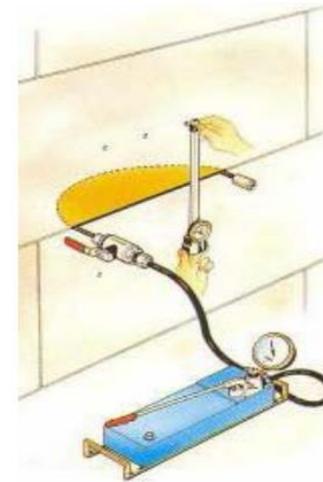
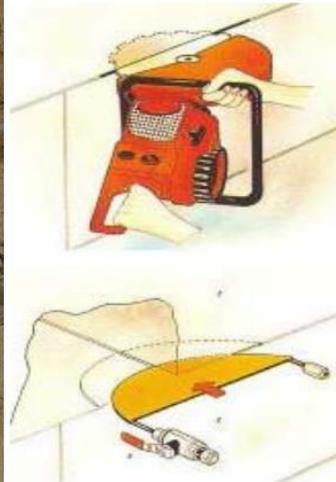


## Caratterizzazione meccanica dei materiali

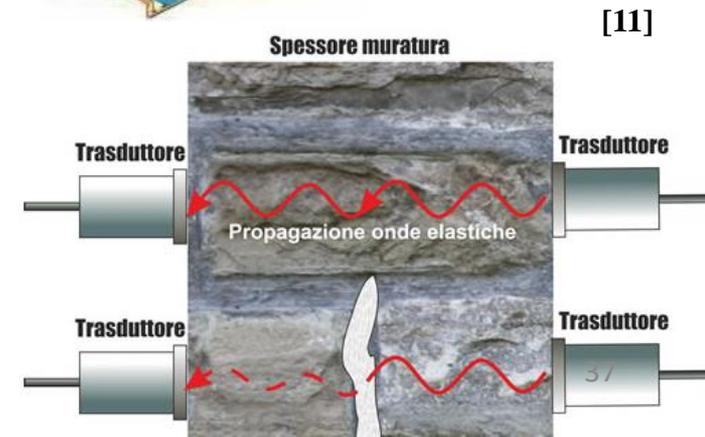
In alcuni casi la modellazione del comportamento strutturale dell'edificio, soprattutto nei riguardi dell'azione sismica, richiede la conoscenza di parametri meccanici di deformabilità e resistenza dei materiali, in particolare della muratura.



Prova in situ di compressione diagonale



[10]



[11]

La conoscenza può essere conseguita con diversi **livelli di approfondimento**, in funzione dell'accuratezza delle operazioni di rilievo, delle ricerche storiche, e delle indagini sperimentali.

Circolare n°17/2019, § C8.5.3.1  
DPCM 9/02/2011, § 4.2

Introduzione **LIVELLI DI CONOSCENZA**

In funzione del livello di approfondimento raggiunto si definiscono i parametri meccanici e i **fattori di confidenza (FC)**

**LC1:** livello di conoscenza limitata cui (FC = 1,35)  
**LC2:** livello di conoscenza adeguata cui (FC = 1,20)  
**LC3:** livello di conoscenza accurata cui (FC = 1,00)

→ **LC1 – CONOSCENZA LIMITATA:** rilievo geometrico completo; limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi; parametri meccanici desunti da dati già disponibili; in assenza di dati geologici e d'informazioni storiche sulle strutture fondali, limitate indagini sul terreno e sulle fondazioni.

→ **LC2 – CONOSCENZA ADEGUATA:** rilievo geometrico completo di restituzione grafica e quadri fessurativi e deformativi; esteso rilievo materico e degli elementi costruttivi; limitate indagini sui parametri meccanici dei materiali; limitate indagini sul terreno e le fondazioni.

→ **LC3 – CONOSCENZA ACCURATA:** rilievo geometrico completo di restituzione grafica e quadri fessurativi e deformativi; esaustivo rilievo materico e degli elementi costruttivi; estese indagini sui parametri meccanici dei materiali; estese o esaustive indagini sul terreno e le fondazioni.

# IL PERCORSO DELLA CONOSCENZA

La conoscenza può essere conseguita con diversi **livelli di approfondimento**, in funzione dell'accuratezza delle operazioni di rilievo, delle ricerche storiche, e delle indagini sperimentali.

Circolare n°17/2019, § C8.5.3.1  
DPCM 9/02/2011, § 4.2

Circolare n°17/2019, § C8.5.1

Introduzione **LIVELLI DI CONOSCENZA**  
In funzione del livello di approfondimento raggiunto si definiscono i parametri meccanici e i **fattori di confidenza (FC)**

- LC1: livello di conoscenza limitata cui (FC = 1,35)
- LC2: livello di conoscenza adeguata cui (FC = 1,20)
- LC3: livello di conoscenza accurata cui (FC = 1,00)

Tabella C8.5.1 -Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura, da usarsi nei criteri di resistenza di seguito specificati (comportamento a tempi brevi), e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura. I valori si riferiscono a:  $f$  = resistenza media a compressione,  $\tau_0$  = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3),  $f_{v0}$  = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3),  $E$  = valore medio del modulo di elasticità normale,  $G$  = valore medio del modulo di elasticità tangenziale,  $w$  = peso specifico medio.

Tipologia di muratura	$f$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\tau_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{v0}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G$ (N/mm <sup>2</sup> )	$w$ (kN/m <sup>3</sup> )
	min-max	min-max	min-max	min-max	min-max	min-max
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	-	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	-	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	-	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,4-2,2	0,028-0,042	-	900-1260	300-420	13 ÷ 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadri	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.; doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

(\*) Nella muratura a conci sbozzati i valori di resistenza tabellati si possono incrementare se si riscontra la sistematica presenza di zeppe profonde in pietra che migliorano i contatti e aumentano l'ammorsamento tra gli elementi lapidei; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente pari a 1,2.  
 (\*\*) Data la varietà litologica della pietra tenera, il peso specifico è molto variabile ma può essere facilmente stimato con prove dirette. Nel caso di muratura a conci regolari di pietra tenera, in presenza di una caratterizzazione diretta della resistenza a compressione degli elementi costituenti, la resistenza a compressione può essere valutata attraverso le indicazioni del § 11.10 delle NTC.  
 (\*\*\*) Nella muratura a mattoni pieni è opportuno ridurre i valori tabellati nel caso di giunti con spessore superiore a 13 mm; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente riduttivo pari a 0,7 per le resistenze e 0,8 per i moduli elastici.

## Proprietà dei materiali

Tabella C8.5.11 -Coefficienti correttivi massimi da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone; ricorsi o listature; sistematiche connessioni trasversali; consolidamento con iniezioni di malta; consolidamento con intonaco armato; risilatura armata con connessione dei paramenti.

Tipologia di muratura	Stato di fatto			Interventi di consolidamento			
	Malta buona	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Iniezione di miscele leganti (*)	Intonaco armato (**)	Risilatura armata con connessione dei paramenti (***)	Massimo coefficiente complessivo
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	1,3	1,5	2	2,5	1,6	3,5
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo	1,4	1,2	1,5	1,7	2,0	1,5	3,0
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	1,1	1,3	1,5	1,5	1,4	2,4
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,5	1,2	1,3	1,4	1,7	1,1	2,0
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,6	-	1,2	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura a blocchi lapidei squadri	1,2	-	1,2	1,2	1,2	-	1,4
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	(***)	-	1,3 (****)	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.; doppio UNI foratura ≤40%)	1,2	-	-	-	1,3	-	1,3

(\*) I coefficienti correttivi relativi alle iniezioni di miscele leganti devono essere commisurati all'effettivo beneficio apportato alla muratura, riscontrabile con verifiche sia nella fase di esecuzione (iniettabilità) sia a-posteriori (ricorsi sperimentali) attraverso prove soniche o similari.  
 (\*\*) Valori da ridurre convenientemente nel caso di pareti di notevole spessore (p.es. >70 cm).  
 (\*\*\*) Nel caso di muratura di mattoni si intende come "malta buona" una malta con resistenza media a compressione  $f_m$  superiore a 2 N/mm<sup>2</sup>. In tal caso il coefficiente correttivo può essere posto pari a  $f_m^{0,10}$  ( $f_m$  in N/mm<sup>2</sup>).  
 (\*\*\*\*) Nel caso di muratura di mattoni si intende come muratura trasversalmente connessa quella apparecchiata a regola d'arte.

# IL PERCORSO DELLA CONOSCENZA

La conoscenza può essere conseguita con diversi **livelli di approfondimento**, in funzione dell'accuratezza delle operazioni di rilievo, delle ricerche storiche, e delle indagini sperimentali.

Circolare n°17/2019, § C8.5.3.1  
DPCM 9/02/2011, § 4.2

Introduzione **LIVELLI DI CONOSCENZA**  
 In funzione del livello di approfondimento raggiunto si definiscono i parametri meccanici e i **fattori di confidenza (FC)**

**LC1:** livello di conoscenza limitata cui (FC = 1,35)  
**LC2:** livello di conoscenza adeguata cui (FC = 1,20)  
**LC3:** livello di conoscenza accurata cui (FC = 1,00)

Il fattore di confidenza (FC) incide su:

- Proprietà dei materiali (nelle analisi nel piano e in quelle di tipo globale)
- Nel calcolo dell'accelerazione di attivazione del meccanismo (nelle analisi cinematiche)

f (N/mm <sup>2</sup> )	$\tau_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{v0}$ (N/mm <sup>2</sup> )	E (N/mm <sup>2</sup> )	G (N/mm <sup>2</sup> )	w (kN/m <sup>3</sup> )
min-max	min-max		min-max	min-max	
1,0-2,0	0,018-0,032	-	690-1050	230-350	19
2,0	0,035-0,051	-	1020-1440	340-480	20
2,6-3,8	0,056-0,074	-	1500-1980	500-660	21
1,4-2,2	0,028-0,042	-	900-1260	300-420	13 ÷ 16(**)
2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

# IL PERCORSO DELLA CONOSCENZA

La conoscenza può essere conseguita con diversi **livelli di approfondimento**, in funzione dell'accuratezza delle operazioni di rilievo, delle ricerche storiche, e delle indagini sperimentali.

Come si determina il **fattore di confidenza (FC)**?

DPCM 9/02/2011, § 4.2

Rilievo geometrico	rilievo geometrico completo	$F_{C1} = 0.05$
	rilievo geometrico completo, con restituzione grafica dei quadri fessurativi e deformativi	$F_{C1} = 0$
Identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica	restituzione ipotetica delle fasi costruttive basata su un limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche)	$F_{C2} = 0.12$
	restituzione parziale delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su: a) limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione e alla verifica delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, verifica diagnostica delle ipotesi storiografiche); b) esteso rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche)	$F_{C2} = 0.06$
	restituzione completa delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su un esaustivo rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, eventuali indagini diagnostiche)	$F_{C2} = 0$
Proprietà meccaniche dei materiali	parametri meccanici desunti da dati già disponibili	$F_{C3} = 0.12$
	limitate indagini sui parametri meccanici dei materiali	$F_{C3} = 0.06$
	estese indagini sui parametri meccanici dei materiali	$F_{C3} = 0$
Terreno e fondazioni	limitate indagini sul terreno e le fondazioni, in assenza di dati geotecnici e disponibilità d'informazioni sulle fondazioni	$F_{C4} = 0.06$
	disponibilità di dati geotecnici e sulle strutture fondazionali; limitate indagini sul terreno e le fondazioni	$F_{C4} = 0.03$
	estese o esaustive indagini sul terreno e le fondazioni	$F_{C4} = 0$

$$F_C = 1 + \sum_{k=1}^4 F_{Ck}$$

**Il calcolo del fattore di confidenza per i beni culturali è molto più dettagliato di quello delle NTC 2018**

Circolare n°617/2009, § C8A.1.A.4, Tab. C8A.1.1

Livello di Conoscenza	Geometria	Dettagli costruttivi	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Rilievo muratura, volte, solai, scale. Individuazione carichi gravanti su ogni elemento di parete. Individuazione tipologia fondazioni. Rilievo eventuale quadro fessurativo e deformativo.	verifiche in situ limitate	Indagini in situ limitate Resistenza: valore minimo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1	Tutti	1.35
LC2		Indagini in situ estese Resistenza: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1	1.20		
LC3		Indagini in situ esaustive -caso a) (disponibili 3 o più valori sperimentali di resistenza) Resistenza: se valore medio sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, valore medio dell'intervallo di Tabella C8A.2.1; se valore medio sperimentale maggiore di estremo superiore intervallo, quest'ultimo; se valore medio sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore medio sperimentale. Modulo elastico: come LC3 - caso a).  -caso b) (disponibili 2 valori sperimentali di resistenza) Resistenza: se valore sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, oppure superiore, valore medio dell'intervallo; se valore sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore sperimentale. Modulo elastico: come LC3 - caso a).  -caso c) (disponibile 1 valore sperimentale di resistenza) Resistenza: se valore sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, oppure superiore, valore medio dell'intervallo; se valore sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore sperimentale. Modulo elastico: come LC3 - caso a).	1.00		

**Una tabella riassuntiva non è più presente nella Circolare esplicativa della NTC 2018**

# IL PERCORSO DELLA CONOSCENZA

La conoscenza può essere conseguita con diversi **livelli di approfondimento**, in funzione dell'accuratezza delle operazioni di rilievo, delle ricerche storiche, e delle indagini sperimentali.

Come si determina il **fattore di confidenza (FC)**?

DPCM 9/02/2011, § 4.2

Circolare n°617/2009, § C8A.1.A.4, Tab. C8A.1.1

Rilievo geometrico	rilievo geometrico completo	$F_{C1} = 0.05$
	rilievo geometrico completo, con restituzione grafica dei quadri fessurativi e deformativi	$F_{C1} = 0$
Identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica	restituzione ipotetica delle fasi costruttive basata su un limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche)	$F_{C2} = 0.12$
	restituzione parziale delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento materico e di comprensione e di ipotesi storico-geometriche (indagini documentarie e tematiche)	
	restituzione completa delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento materico e di comprensione e di ipotesi storico-geometriche (indagini documentarie e tematiche)	
Proprietà meccaniche dei materiali	parametri meccanici	
	limitate indagini sui parametri meccanici dei materiali	$F_{C3} = 0.06$
	estese indagini sui parametri meccanici dei materiali	$F_{C3} = 0$
Terreno e fondazioni	limitate indagini sul terreno e le fondazioni, in assenza di dati geotecnici e disponibilità d'informazioni sulle fondazioni	$F_{C4} = 0.06$
	disponibilità di dati geotecnici e sulle strutture fondazionali; limitate indagini sul terreno e le fondazioni	$F_{C4} = 0.03$
	estese o esaustive indagini sul terreno e le fondazioni	$F_{C4} = 0$

Livello di Conoscenza	Geometria	Dettagli costruttivi	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1		verifiche in situ limitate	Indagini in situ limitate	Tutti	1.35
			Resistenza: valore minimo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1		1.20
LC3	Rilievo eventuale quadro fessurativo e deformativo		Indagini in situ estese	Tutti	1.00
			valore medio dell'intervallo di Tabella C8A.2.1; se valore medio sperimentale maggiore di estremo superiore intervallo, quest'ultimo; se valore medio sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore medio sperimentale. Modulo elastico: come LC3 - caso a).		
			-caso c) (disponibile 1 valore sperimentale di resistenza) Resistenza: se valore sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, oppure superiore, valore medio dell'intervallo; se valore sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore sperimentale. Modulo elastico: come LC3 - caso a).		

**Nel caso in cui l'analisi sismica sia basata sulla valutazione distinta di diversi meccanismi locali potranno essere utilizzati livelli di conoscenza, quindi FATTORI DI CONFIDENZA, relativi a ciascuna porzione modellata**

DPCM 9/02/2011, § 4.2

$$F_C = 1 + \sum_{k=1}^4 F_{Ck}$$

**Il calcolo del fattore di confidenza per i beni culturali è molto più dettagliato di quello delle**

### → Analisi statica lineare

In un'analisi elastica lineare si riscontrano, generalmente, tensioni di trazione non compatibili con le caratteristiche meccaniche della muratura, o elevate tensioni di compressione negli spigoli degli elementi. Nel caso di palazzi e ville, o edifici caratterizzati da pareti di spina e orizzontamenti intermedi, possibile il ricorso a una modellazione a telaio equivalente, che consente verifiche di tipo non puntuale ma a livello dell'elemento strutturale e riferite a condizioni locali fessurate. Questo permette di evitare le incongruenze meccaniche appena descritte.

### → Analisi dinamica modale

Utilizzata per valutare il modo principale di vibrazione in ciascuna direzione e determinare quindi un'attendibile distribuzione di forze da adottare nell'analisi statica lineare. L'analisi modale con spettro di risposta non dovrebbe considerarsi attendibile, soprattutto in strutture complesse caratterizzate da trasformazioni e fasi costruttive differenti. L'analisi dinamica modale è più attendibile nel caso di strutture flessibili (ad esempio campanili e torri).

### → Analisi statica non lineare

Può essere eseguita con un modello globale della fabbrica o attraverso modelli di sottostrutture (macroelementi) operando verifiche locali

### → Analisi dinamica non lineare

Può essere utilizzata per modelli non lineari ad elementi finiti (o a telaio equivalente), purché i legami costitutivi siano in grado di simulare non solo il degrado di rigidezza e resistenza a livello puntuale, ma anche le caratteristiche dissipative associate al comportamento ciclico isteretico.

### → Analisi cinematica lineare

È un'analisi per macroelementi. Si effettua una verifica dell'equilibrio di un sistema labile. Tale verifica è estesa a tutti i possibili meccanismi locali che potrebbero attivarsi e che si ritengono più significativi per il manufatto.

### → Analisi cinematica non lineare

Consiste nel determinare il massimo spostamento che può sopportare un cinematismo ("capacità") e confrontarlo con un valore di riferimento ("domanda di spostamento") dipendente, anche, dall'azione sismica attesa al suolo

Definizione del livello di sicurezza sismica di riferimento differenziato in funzione delle caratteristiche proprie dei manufatti e del loro uso. Si definiscono:

→ la vita nominale  $V_N$

→ la classe d'uso  $C_U$  (uso saltuario o non utilizzato, uso frequente, uso molto frequente)

Definizione di un indice di sicurezza sismica

$$I_{S,SLV} = \frac{T_{SLV}}{T_{R,SLV}}$$

→ Periodo di ritorno dell'azione sismica che porta allo SL

→ Periodo di ritorno di riferimento corrispondente

$I_{S,SLV} \geq 1$  → manufatto in condizioni di sicurezza rispetto ai valori assunti come riferimento per la vita nominale e per quel particolare uso

$I_{S,SLV} < 1$  → manufatto non in sicurezza, valutare un intervento di miglioramento

Analogamente si può definire un fattore di accelerazione

$$f_{a,SLV} = \frac{a_{SLV}}{a_{g,SLV}}$$

→ Accelerazione al suolo che porta al raggiungimento dello SLV (riferita al suolo di tipo A)

→ Accelerazione corrispondente al periodo di riferimento (riferita al suolo di tipo A)

### → Palazzi, ville e altre strutture con pareti di spina e orizzontamenti intermedi

- modello a telaio equivalente se: struttura regolare, buona qualità dei materiali e cura nel dettaglio costruttivo
- modello globale agli elementi finiti se: struttura molto particolare non riconducibile a telaio equivalente
- meccanismi locali se: presenti particolari elementi architettonici (ad esempio: grandi atri, logge, chiostri).

**Di fondamentale importanza e in nessun caso può essere sostituita da un'analisi globale**

Edifici storici anche se realizzati con materiali e tecniche di buona qualità, spesso non hanno collegamenti a livello di piano.

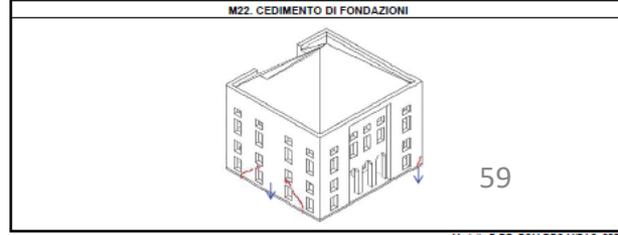
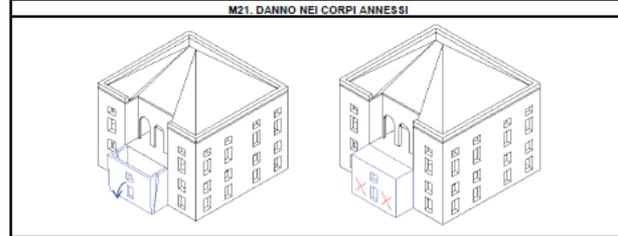
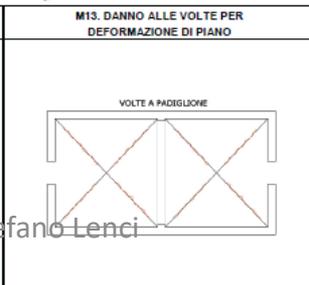
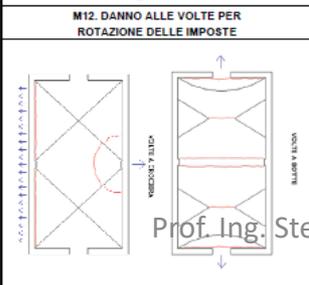
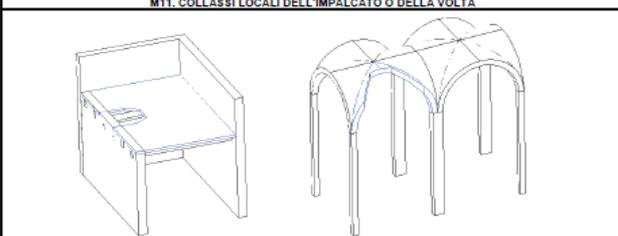
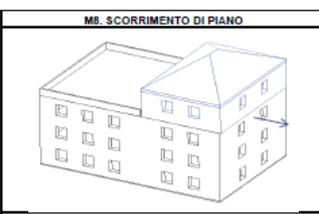
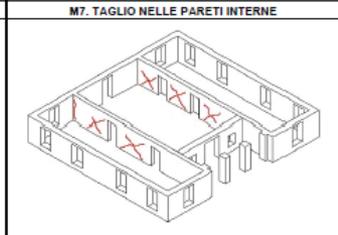
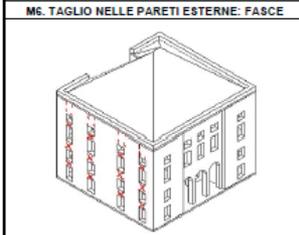
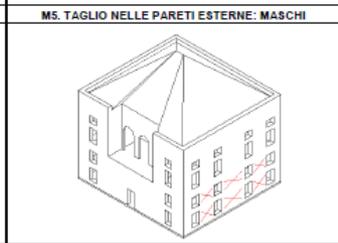
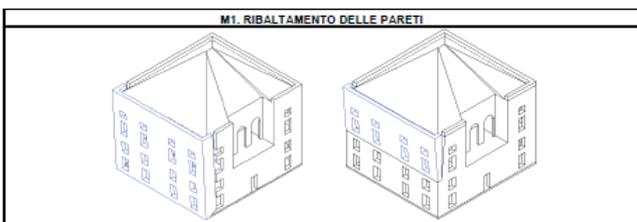
## Modelli di valutazione per tipologie

DPCM 9/02/2011, § 5.4.2



EMERGENZA POST-SISMA

### SCHEDA PER IL RILIEVO DEL DANNO AI BENI CULTURALI - PALAZZI



Prof. Ing. Stefano Lenci

→ Palazzi, ville e altre strutture con pareti di spina e orizzontamenti intermedi

La direttiva propone un modello semplificato di valutazione della sicurezza nell'ipotesi di pareti sollecitate nel proprio piano e nell'ambito di un comportamento complessivo della struttura.

Con riferimento alla condizione che porta al raggiungimento dello SLV è possibile ricavare il valore dell'ordinata dello spettro di risposta elastico:

$$S_{e,SLV} = \frac{q F_{SLV}}{e^* M}$$

$$F_{SLV,xi} = \frac{\mu_{xi} \xi_{xi} \zeta_x A_{xi} \tau_{di}}{\beta_{xi} K_i}$$

coeff. di omogeneità di rigidezza e resistenza dei maschi murari

$$\mu_{xi} = 1 - 0.2 \sqrt{\frac{N_{mxi} \sum_j A_{xi,j}^2}{A_{xi}^2}} - 1 \geq 0.8 \quad (5.8)$$

dove:  $N_{mxi}$  è il numero di maschi murari in direzione  $x$ , al piano  $i$ ;  $A_{xi,j}$  è l'area del generico maschio in direzione  $x$  al piano  $i$  (la sommatoria è estesa a tutti i maschi del piano -  $\sum_j A_{xi,j} = A_{xi}$ ).

## Modelli di valutazione per tipologie

DPCM 9/02/2011, § 5.4.2

→ Palazzi, ville e altre strutture con pareti di spina e orizzontamenti intermedi

La direttiva propone un modello semplificato di valutazione della sicurezza nell'ipotesi di pareti sollecitate nel proprio piano e nell'ambito di un comportamento complessivo della struttura.

Con riferimento alla condizione che porta al raggiungimento dello SLV è possibile ricavare il valore dell'ordinata dello spettro di risposta elastico:

$$S_{e,SLV} = \frac{qF_{SLV}}{e^* M}$$

$$F_{SLV,xi} = \frac{\mu_{xi} \xi_{xi} \zeta_x A_{xi} \tau_{di}}{\beta_{xi} K_i}$$

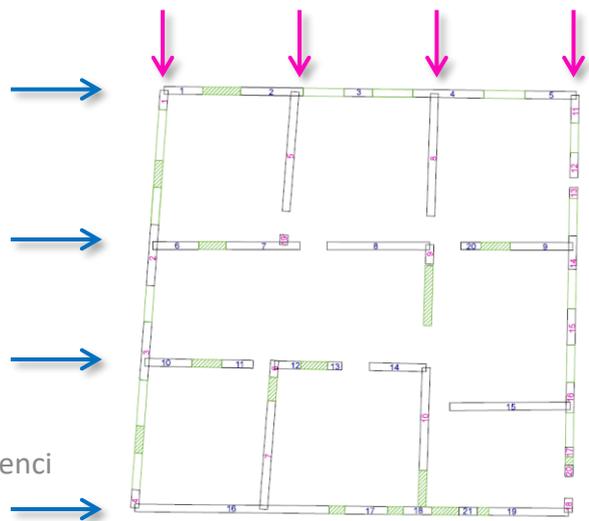
coeff. di omogeneità di rigidezza e resistenza dei maschi murari

$$\mu_{xi} = 1 - 0.2 \sqrt{\frac{N_{mxi} \sum_j A_{xi,j}^2}{A_{xi}^2}} - 1 \geq 0.8 \quad (5.8)$$

dove:  $N_{mxi}$  è il numero di maschi murari in direzione x, al piano i;  $A_{xi,j}$  è l'area del generico maschio in direzione x al piano i (la sommatoria è estesa a tutti i maschi del piano -  $\sum_j A_{xi,j} = A_{xi}$ ).

Maschi murari in direzione x

Maschi murari in direzione y



→ Palazzi, ville e altre strutture con pareti di spina e orizzontamenti intermedi

La direttiva propone un modello semplificato di valutazione della sicurezza nell'ipotesi di pareti sollecitate nel proprio piano e nell'ambito di un comportamento complessivo della struttura.

Con riferimento alla condizione che porta al raggiungimento dello SLV è possibile ricavare il valore dell'ordinata dello spettro di risposta elastico:

$$S_{e,SLV} = \frac{qF_{SLV}}{e^* M}$$

$$F_{SLV,xi} = \frac{\mu_{xi} \xi_{xi} \alpha_x A_{xi} \tau_{di}}{\beta_{xi} K_i}$$

coeff. di omogeneità di rigidezza e resistenza dei maschi murari

$$\mu_{xi} = 1 - 0.2 \sqrt{\frac{N_{mxi} \sum_j A_{xi,j}^2}{A_{xi}^2}} - 1 \geq 0.8 \quad (5.8)$$

dove:  $N_{mxi}$  è il numero di maschi murari in direzione  $x$ , al piano  $i$ ;  $A_{xi,j}$  è l'area del generico maschio in direzione  $x$  al piano  $i$  (la sommatoria è estesa a tutti i maschi del piano -  $\sum_j A_{xi,j} = A_{xi}$ ).

coeff. legato al tipo di rottura prevista in prevalenza dei maschi murari all' $i$ -esimo piano



- $\xi_{xi}$  è un coefficiente legato al tipo di rottura prevista in prevalenza nei maschi murari dell' $i$ -esimo piano; esso vale 1 nel caso di collasso per taglio, mentre può essere assunto pari a 0.8 nel caso di collasso per presso-flessione (maschi snelli, poco caricati verticalmente o **in presenza di fasce deboli**);

→ Palazzi, ville e altre strutture con pareti di spina e orizzontamenti intermedi

La direttiva propone un modello semplificato di valutazione della sicurezza nell'ipotesi di pareti sollecitate nel proprio piano e nell'ambito di un comportamento complessivo della struttura.

Con riferimento alla condizione che porta al raggiungimento dello SLV è possibile ricavare il valore dell'ordinata dello spettro di risposta elastico:

$$S_{e,SLV} = \frac{qF_{SLV}}{e^* M}$$

$$F_{SLV,xi} = \frac{\mu_{xi} \xi_{xi} \zeta_x A_{xi} \tau_{di}}{\beta_{xi} K_i}$$

coeff. di omogeneità di rigidezza e resistenza dei maschi murari

$$\mu_{xi} = 1 - 0.2 \sqrt{\frac{N_{mxi} \sum_j A_{xi,j}^2}{A_{xi}^2}} - 1 \geq 0.8 \quad (5.8)$$

dove:  $N_{mxi}$  è il numero di maschi murari in direzione  $x$ , al piano  $i$ ;  $A_{xi,j}$  è l'area del generico maschio in direzione  $x$  al piano  $i$  (la sommatoria è estesa a tutti i maschi del piano -  $\sum_j A_{xi,j} = A_{xi}$ ).

coeff. legato al tipo di rottura prevista in prevalenza dei maschi murari all' $i$ -esimo piano

coeff. legato alla resistenza delle fasce murarie di piano nelle pareti disposte in direzione  $x$

- $\zeta_x$  è un coefficiente legato alla resistenza delle fasce murarie di piano nelle pareti disposte in direzione  $x$ ; esso vale 1 nel caso di fasce resistenti (rottura dei maschi murari verticali), mentre può assumere un valore minore (fino a **0.8**) nel caso di fasce deboli, non in grado di bloccare la rotazione alle estremità dei maschi murari.

## Modelli di valutazione per tipologie

DPCM 9/02/2011, § 5.4.2

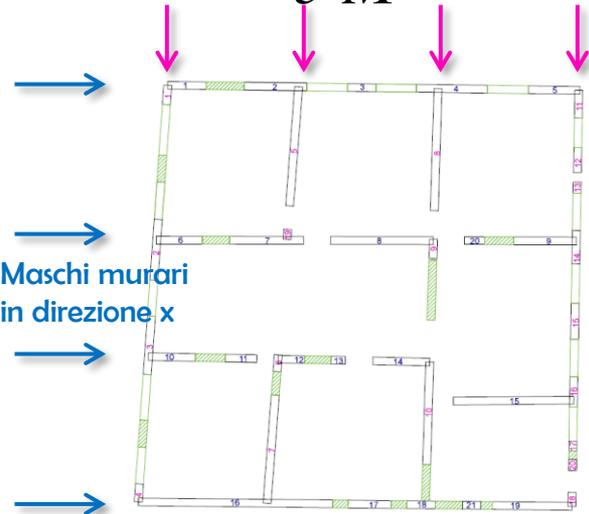
→ Palazzi, ville e altre strutture con pareti di spina e orizzontamenti intermedi

La direttiva propone un modello semplificato di valutazione della sicurezza nell'ipotesi di pareti sollecitate nel proprio piano e nell'ambito di un comportamento complessivo della struttura.

Con riferimento alla condizione che porta al raggiungimento dello SLV è possibile ricavare il valore dell'ordinata dello spettro di risposta elastico:

$$S_{e,SLV} = \frac{qF_{SLV}}{e^* M}$$

$$F_{SLV,xi} = \frac{\mu_{xi} \xi_{xi} \zeta_{xi} A_{xi} \tau_{di}}{\beta_{xi} K_i}$$



Maschi murari in direzione y

Maschi murari in direzione x

coeff. di omogeneità di rigidezza e resistenza dei maschi murari

$$\mu_{xi} = 1 - 0.2 \sqrt{\frac{N_{mxi} \sum_j A_{xi,j}^2}{A_{xi}^2}} - 1 \geq 0.8 \quad (5.8)$$

dove:  $N_{mxi}$  è il numero di maschi murari in direzione x, al piano i;  $A_{xi,j}$  è l'area del generico maschio in direzione x al piano i (la sommatoria è estesa a tutti i maschi del piano -  $\sum_j A_{xi,j} = A_{xi}$ ).

coeff. legato al tipo di rottura prevista in prevalenza dei maschi murari all'i-esimo piano

coeff. legato alla resistenza delle fasce murarie di piano nelle pareti disposte in direzione x

Area resistente a taglio dei muri dell'i-esimo piano, posti secondo la direzione x (è opportuno considerare anche i pannelli aventi inclinazione compresa tra  $\pm 45^\circ$ , considerando un'area efficace ridotta dal coefficiente  $\cos\alpha$ )

## Modelli di valutazione per tipologie

DPCM 9/02/2011, § 5.4.2

→ Palazzi, ville e altre strutture con pareti di spina e orizzontamenti intermedi

La direttiva propone un modello semplificato di valutazione della sicurezza nell'ipotesi di pareti sollecitate nel proprio piano e nell'ambito di un comportamento complessivo della struttura.

Con riferimento alla condizione che porta al raggiungimento dello SLV è possibile ricavare il valore dell'ordinata dello spettro di risposta elastico:

$$S_{e,SLV} = \frac{qF_{SLV}}{e * M}$$

$$F_{SLV,xi} = \frac{\mu_{xi} \xi_{xi} \zeta_{xi} A_{xi} \tau_{di}}{\beta_{xi} K_i}$$

coeff. di omogeneità di rigidezza e resistenza dei maschi murari

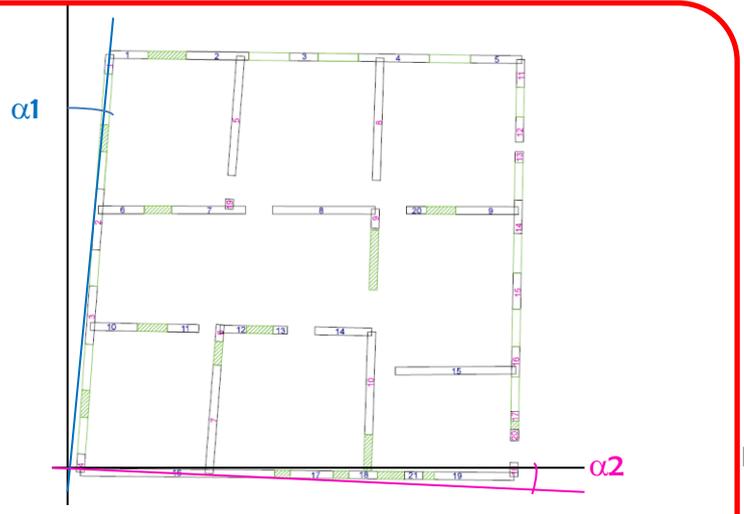
$$\mu_{xi} = 1 - 0.2 \sqrt{\frac{N_{mxi} \sum_j A_{xi,j}^2}{A_{xi}^2}} - 1 \geq 0.8 \quad (5.8)$$

dove:  $N_{mxi}$  è il numero di maschi murari in direzione x, al piano i;  $A_{xi,j}$  è l'area del generico maschio in direzione x al piano i (la sommatoria è estesa a tutti i maschi del piano -  $\sum_j A_{xi,j} = A_{xi}$ ).

coeff. legato al tipo di rottura prevista in prevalenza dei maschi murari all'i-esimo piano

coeff. legato alla resistenza delle fasce murarie di piano nelle pareti disposte in direzione x

Area resistente a taglio dei muri dell'i-esimo piano, posti secondo la direzione x (è opportuno considerare anche i pannelli aventi inclinazione compresa tra  $\pm 45^\circ$ , considerando un'area efficace ridotta dal coefficiente  $\cos\alpha$ )



→ Palazzi, ville e altre strutture con pareti di spina e orizzontamenti intermedi

La direttiva propone un modello semplificato di valutazione della sicurezza nell'ipotesi di pareti sollecitate nel proprio piano e nell'ambito di un comportamento complessivo della struttura.

Con riferimento alla condizione che porta al raggiungimento dello SLV è possibile ricavare il valore dell'ordinata dello spettro di risposta elastico:

$$S_{e,SLV} = \frac{qF_{SLV}}{e^* M}$$

$$F_{SLV,xi} = \frac{\mu_{xi} \xi_{xi} \zeta_x A_{xi} \tau_{di}}{\beta_{xi} K_i}$$

valore di calcolo della resistenza a taglio della muratura nei maschi murari del piano i-esimo

$$\tau_{di} = \tau_{od} \sqrt{1 + \frac{\sigma_{oi}}{1.5\tau_{od}}}$$

dove:  $\tau_{od}$  è valore di calcolo della resistenza a taglio della muratura (valutato tenendo conto del fattore di confidenza  $F_C$ );  $\sigma_{oi}$  è la tensione verticale media sulla superficie resistente dei muri all'i-esimo piano;

coeff. di omogeneità di rigidezza e resistenza dei maschi murari

$$\mu_{xi} = 1 - 0.2 \sqrt{\frac{N_{mxi} \sum_j A_{xi,j}^2}{A_{xi}^2}} - 1 \geq 0.8 \quad (5.8)$$

dove:  $N_{mxi}$  è il numero di maschi murari in direzione x, al piano i;  $A_{xi,j}$  è l'area del generico maschio in direzione x al piano i (la sommatoria è estesa a tutti i maschi del piano -  $\sum_j A_{xi,j} = A_{xi}$ ).

coeff. legato al tipo di rottura prevista in prevalenza dei maschi murari all'i-esimo piano

coeff. legato alla resistenza delle fasce murarie di piano nelle pareti disposte in direzione x

Area resistente a taglio dei muri dell'i-esimo piano, posti secondo la direzione x (è opportuno considerare anche i pannelli aventi inclinazione compresa tra  $\pm 45^\circ$ , considerando un'area efficace ridotta dal coefficiente  $\cos\alpha$ )

## Modelli di valutazione per tipologie

DPCM 9/02/2011, § 5.4.2

→ Palazzi, ville e altre strutture con pareti di spina e orizzontamenti intermedi

La direttiva propone un modello semplificato di valutazione della sicurezza nell'ipotesi di pareti sollecitate nel proprio piano e nell'ambito di un comportamento complessivo della struttura.

Con riferimento alla condizione che porta al raggiungimento dello SLV è possibile ricavare il valore dell'ordinata dello spettro di risposta elastico:

$$S_{e,SLV} = \frac{q F_{SLV}}{e^* M}$$

$$F_{SLV,xi} = \frac{\mu_{xi} \xi_{xi} \zeta_x A_{xi} \tau_{di}}{\beta_{xi} \kappa_i}$$

valore di calcolo della resistenza a taglio della muratura nei maschi murari del piano i-esimo

$$\tau_{di} = \tau_{od} \sqrt{1 + \frac{\sigma_{oi}}{1.5 \tau_{od}}}$$

coeff. di irregolarità in pianta al piano i-esimo, associato alla eccentricità  $e_{yi}$ , del centro delle rigidezze rispetto al baricentro delle masse (la cui entità può essere stimata), ed alla distanza  $d_{yi}$  tra il baricentro delle rigidezze e la parete in direzione x più esterna

$$\beta_{xi} = 1 + 2 \frac{e_{yi}}{d_{yi}} \leq 1.25$$

coeff. di omogeneità di rigidezza e resistenza dei maschi murari

$$\mu_{xi} = 1 - 0.2 \sqrt{\frac{N_{mxi} \sum_j A_{xi,j}^2}{A_{xi}^2}} - 1 \geq 0.8 \tag{5.8}$$

dove:  $N_{mxi}$  è il numero di maschi murari in direzione x, al piano i;  $A_{xi,j}$  è l'area del generico maschio in direzione x al piano i (la sommatoria è estesa a tutti i maschi del piano -  $\sum_j A_{xi,j} = A_{xi}$ ).

coeff. legato al tipo di rottura prevista in prevalenza dei maschi murari all'i-esimo piano

coeff. legato alla resistenza delle fasce murarie di piano nelle pareti disposte in direzione x

Area resistente a taglio dei muri dell'i-esimo piano, posti secondo la direzione x (è opportuno considerare anche i pannelli aventi inclinazione compresa tra  $\pm 45^\circ$ , considerando un'area efficace ridotta dal coefficiente  $\cos \alpha$ )

## Modelli di valutazione per tipologie

DPCM 9/02/2011, § 5.4.2

→ Palazzi, ville e altre strutture con pareti di spina e orizzontamenti intermedi

La direttiva propone un modello semplificato di valutazione della sicurezza nell'ipotesi di pareti sollecitate nel proprio piano e nell'ambito di un comportamento complessivo della struttura.

Con riferimento alla condizione che porta al raggiungimento dello SLV è possibile ricavare il valore dell'ordinata dello spettro di risposta elastico:

$$S_{e,SLV} = \frac{q F_{SLV}}{e^* M}$$

$$F_{SLV,xi} = \frac{\mu_{xi} \xi_{xi} \zeta_x A_{xi} \tau_{di}}{\beta_{xi} K_i}$$

valore di calcolo della resistenza a taglio della muratura nei maschi murari del piano i-esimo

$$\tau_{di} = \tau_{od} \sqrt{1 + \frac{\sigma_{oi}}{1.5 \tau_{od}}}$$

coeff. di irregolarità in pianta al piano i-esimo, associato alla eccentricità  $e_{yi}$ , del centro delle rigidezze rispetto al baricentro delle masse (la cui entità può essere stimata), ed alla distanza  $d_{yi}$  tra il baricentro delle rigidezze e la parete in direzione x più esterna

$$\beta_{xi} = 1 + 2 \frac{e_{yi}}{d_{yi}} \leq 1.25$$

coeff. di omogeneità di rigidezza e resistenza dei maschi murari

$$\mu_{xi} = 1 - 0.2 \sqrt{\frac{N_{mxi} \sum_j A_{xi,j}^2}{A_{xi}^2}} - 1 \geq 0.8 \quad (5.8)$$

dove:  $N_{mxi}$  è il numero di maschi murari in direzione x, al piano i;  $A_{xi,j}$  è l'area del generico maschio in direzione x al piano i (la sommatoria è estesa a tutti i maschi del piano -  $\sum_j A_{xi,j} = A_{xi}$ ).

coeff. legato al tipo di rottura prevista in prevalenza dei maschi murari all'i-esimo piano

coeff. legato alla resistenza delle fasce murarie di piano nelle pareti disposte in direzione x

Area resistente a taglio dei muri dell'i-esimo piano, posti secondo la direzione x (è opportuno considerare anche i pannelli aventi inclinazione compresa tra  $\pm 45^\circ$ , considerando un'area efficace ridotta dal coefficiente  $\cos \alpha$ )

coeff. necessario per ipotizzare una forma modale

→ Palazzi, ville e altre strutture con pareti di spina e orizzontamenti intermedi

La direttiva propone un modello semplificato di valutazione della sicurezza nell'ipotesi di pareti sollecitate nel proprio piano e nell'ambito di un comportamento complessivo della struttura.

Con riferimento alla condizione che porta al raggiungimento dello SLV è possibile ricavare il valore dell'ordinata dello spettro di risposta elastico:

$$S_{e,SLV} = \frac{qF_{SLV}}{e^* M}$$

Frazione di massa partecipante sul primo modo di vibrare della struttura

Massa, associata ai carichi gravitazionali, da considerare per la valutazione dell'azione sismica allo SLV

$$M = \frac{(G_k + \sum_1^N \Psi_{2j} Q_{kj})}{g}$$

$$a_{SLV} = \begin{cases} \frac{S_{e,SLV}(T_1)}{SF_0} & T_B \leq T_1 < T_C \\ \frac{S_{e,SLV}(T_1)}{SF_0} \frac{T_1}{T_C} & T_C \leq T_1 < T_D \end{cases}$$

Calcolo l'accelerazione, riferita a suolo rigido (categoria di sottosuolo A), che porta al raggiungimento dello stato limite ultimo in quel sito, con cui calcolare il fattore di accelerazione fa



$$f_{a,SLV} = \frac{a_{SLV}}{a_{g,SLV}}$$

## Modelli di valutazione per tipologie

DPCM 9/02/2011, § 5.4.3

→ Chiese, luoghi di culto e altre strutture con grandi aule, senza orizzontamenti intermedi

L'analisi sistematica dei danni subiti dalle chiese in occasione dei principali eventi sismici italiani degli ultimi decenni ha evidenziato come il comportamento sismico di questa tipologia di manufatti possa essere interpretato attraverso la loro scomposizione in porzioni architettoniche (macroelementi), caratterizzate da una risposta strutturale sostanzialmente autonoma rispetto alla chiesa nel suo complesso (facciata, aula, abside, campanile, cupola, arco trionfale, ecc.).



È preferibile procedere con verifiche locali

## Modelli di valutazione per tipologie

DPCM 9/02/2011, § 5.4.3

→ Palazzi, ville e altre strutture con pareti di spina e orizzontamenti intermedi

→ Chiese, luoghi di culto e altre strutture con grandi aule, senza orizzontamenti intermedi



EMERGENZA POST-SISMA

### SCHEDA PER IL RILIEVO DEL DANNO AI BENI CULTURALI – CHIESE

<p>1 - RIBALTAMENTO DELLA FACCIATA</p>	<p>2 - MECCANISMI NELLA SOMMITÀ DELLA FACCIATA</p>
<p>3 - MECCANISMI NEL PIANO DELLA FACCIATA</p>	<p>4 - PROTIRO E NARTECE</p>
<p>5 - RISPOSTA TRASVERSALE DELL'AULA</p>	<p>6 - MECCANISMI DI TAGLIO PARETI LATERALI</p>
<p>7 - RISPOSTA LONGITUDINALE DEL COLONNATO</p>	<p>8 - VOLTE DELL'AULA O DELLA NAVATA CENTRALE</p>
<p>9 - VOLTE DELLE NAVATE LATERALI</p>	<p>10 - RIBALTAMENTO PARETI DEL TRANSETTO</p>

<p>11 - MECCANISMI DI TAGLIO DEL TRANSETTO</p>	<p>12 - VOLTE DEL TRANSETTO</p>
<p>13 - ARCHI TRIONFALI</p>	<p>14 - CUPOLA E TAMBURO / TIBURIO</p>
<p>15 - LANTERNA</p>	<p>16 - RIBALTAMENTO DELL'ABSIDE</p>
<p>17 - MECCANISMI DI TAGLIO NELL'ABSIDE</p>	<p>18 - VOLTE DEL PRESBITERIO O DELL'ABSIDE</p>
<p>19 - ELEMENTI DI COPERTURA: AULA</p>	<p>20 - ELEMENTI DI COPERTURA: TRANSETTO</p>

<p>21 - ELEMENTI DI COPERTURA: ABSIDE</p>	<p>22 - RIBALTAMENTO DELLE CAPPELLE</p>
<p>23 - MECCANISMI DI TAGLIO NELLE CAPPELLE</p>	<p>24 - VOLTE DELLE CAPPELLE</p>
<p>25 - INTERAZIONI IN PROSSIMITA' DI IRREGOLARITÀ</p>	<p>26 - AGGETTI (VELA, GUGLIE, PINNACOLI, STATU...</p>
<p>27 - TORRE CAMPANARIA</p>	<p>28 - CELLA CAMPANARIA</p>

→ Chiese, luoghi di culto e altre strutture con grandi aule, senza orizzontamenti intermedi

Il comportamento sismico dell'intero edificio è rappresentato, su base statistica, da:

- un **indice di vulnerabilità  $I_v$** , variabile tra 0 e 1, che è definito come media pesata del comportamento delle diverse parti della chiesa

### Valutazione dell'indice di vulnerabilità e dell'indice di danno PREVISIONALE (PRE-SISMA)

- un **indice di danno  $I_d$** , variabile tra 0 e 1, come media normalizzata dei danni locali:

*Importanza di una corretta individuazione del  
numero di meccanismi potenzialmente  
possibili per una corretta valutazione  
dell'indice di danno*

## Modelli di valutazione per tipologie

DPCM 9/02/2011, § 5.4.3

→ Chiese, luoghi di culto e altre strutture con grandi aule, senza orizzontamenti intermedi

Il comportamento sismico dell'intero edificio è rappresentato, su base statistica, da:

- un **indice di vulnerabilità  $I_v$** , variabile tra 0 e 1, che è definito come media pesata del comportamento delle diverse parti della chiesa

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (V_{ki} - V_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2}$$

- un **indice di danno  $I_d$** , variabile tra 0 e 1, come media normalizzata dei danni locali:

$V_{ki}$ ,  $V_{kp}$  – punteggio ottenuto dal rilievo degli indicatori di vulnerabilità e dei presidi antisismici

Numero degli indicatori di vulnerabilità o dei presidi antisismici	Giudizio dell'efficacia	$V_k$
almeno 1	3	3
almeno 2	2	
1	2	2
almeno 2	1	
1	1	1
Nessuno	0	0

## Modelli di valutazione per tipologie

DPCM 9/02/2011, § 5.4.3

→ Chiese, luoghi di culto e altre strutture con grandi aule, senza orizzontamenti intermedi

Il comportamento sismico dell'intero edificio è rappresentato, su base statistica, da:

- un **indice di vulnerabilità**  $i_v$ , variabile tra 0 e 1, che è definito come media pesata del comportamento delle diverse parti della chiesa

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2}$$

- un **indice di danno**  $i_d$ , variabile tra 0 e 1, come media normalizzata dei danni locali:

$$i_d = \frac{1}{5} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k d_k}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k}$$

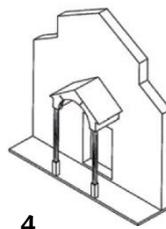
$\rho_k$  – peso attribuito al meccanismo

$\rho_k = 0$  – per meccanismi non presenti (che non si potrebbero verificare)

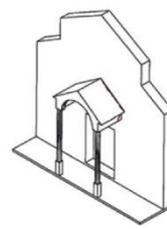
$\rho_k = 1$  – per meccanismi presenti o attivabili

**A ECCEZIONE DI**

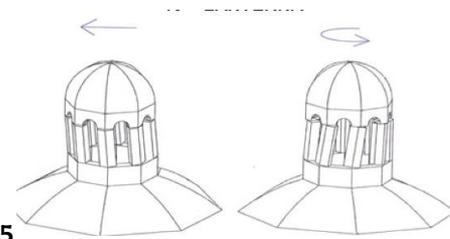
$\rho_k = 0,5$  – per meccanismi 4 e 15



4



15



## Modelli di valutazione per tipologie

DPCM 9/02/2011, § 5.4.3

→ Chiese, luoghi di culto e altre strutture con grandi aule, senza orizzontamenti intermedi

Il comportamento sismico dell'intero edificio è rappresentato, su base statistica, da:

- un **indice di vulnerabilità**  $i_v$ , variabile tra 0 e 1, che è definito come media pesata del comportamento delle diverse parti della chiesa

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2}$$

- un **indice di danno**  $i_d$ , variabile tra 0 e 1, come media normalizzata dei danni locali:

$$i_d = \frac{1}{5} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k d_k}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k}$$

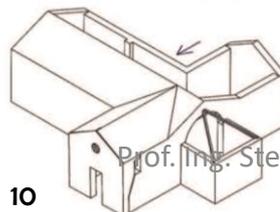
$\rho_k$  – peso attribuito al meccanismo

$\rho_k = 0$  – per meccanismi non presenti (che non si potrebbero verificare)

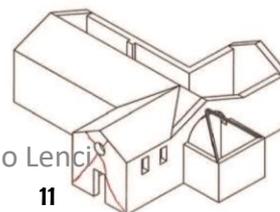
$\rho_k = 1$  – per meccanismi presenti o attivabili

### A ECCEZIONE DI

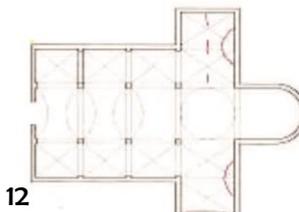
$0,5 < \rho_k < 1$  – per meccanismi 10-12, 18, 20, 22-26 (in relazione all'importanza dell'elemento nel contesto della costruzione)



10



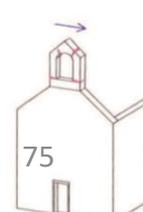
11



12



26



75



## Modelli di valutazione per tipologie

DPCM 9/02/2011, § 5.4.3

→ Chiese, luoghi di culto e altre strutture con grandi aule, senza orizzontamenti intermedi

Il comportamento sismico dell'intero edificio è rappresentato, su base statistica, da:

- un **indice di vulnerabilità**  $I_v$ , variabile tra 0 e 1, che è definito come media pesata del comportamento delle diverse parti della chiesa

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2}$$

- un **indice di danno**  $I_d$ , variabile tra 0 e 1, come media normalizzata dei danni locali:

$$i_d = \frac{1}{5} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k d_k}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k}$$

$d_k$  – livello di danno subito dal  $k$ -esimo meccanismo (da 0 a 5)

# Indice di vulnerabilità (PREVISIONALE)

DPCM 9/02/2011, allegato C

Per ogni meccanismo vengono suggeriti i possibili elementi di presidio antisismico e gli indicatori di vulnerabilità; a queste liste possono essere aggiunti altri elementi che dovessero emergere, a seguito di una specifica conoscenza della costruzione, come significativi per la valutazione del comportamento sismico della chiesa. A ciascun presidio o indicatore di vulnerabilità rilevato deve essere attribuito, rispettivamente, un grado di efficacia o di gravità, con un punteggio da 1 a 3.

Numero degli indicatori di vulnerabilità o dei presidi antisismici	Giudizio dell'efficacia	$v_k$
almeno 1	3	3
almeno 2	2	
1	2	2
almeno 2	1	
1	1	1
Nessuno	0	0

## 1 – RIBALTAMENTO DELLA FACCIATA

Distacco della facciata dalle pareti o evidenti fuori piombo

*Presidi antisismici*

Presenza di catene longitudinali

Presenza di efficaci elementi di contrasto (contrafforti, corpi addossati, altri edifici)

Ammorsamento di buona qualità tra la facciata ed i muri della navata

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di elementi spingenti (puntoni di copertura, volte, archi)

Presenza di grandi aperture nelle pareti laterali in vicinanza del cantonale

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} p_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} p_k} + \frac{1}{2}$$

## 2 - MECCANISMI NELLA SOMMITÀ DELLA FACCIATA

Ribaltamento del timpano, con lesione orizzontale o a V – Disgregazione della muratura o scorrimento del cordolo – Rotazione delle capriate

*Presidi antisismici*

Presenza di collegamenti puntuali con gli elementi della copertura

Presenza di controventi di falda

Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di grandi aperture (rosone)

Presenza di una sommità a vela di grande dimensione e peso

Cordoli rigidi, trave di colmo in c.a., copertura pesante in c.a.

## 3 - MECCANISMI NEL PIANO DELLA FACCIATA

Lesioni inclinate (taglio) – Lesioni verticali o arcuate (rotazione) – Altre fessurazioni o spanciamenti

### *Presidi antisismici*

Presenza di una catena in controfacciata

Contrasto laterale fornito da corpi addossati; chiesa inserita in aggregato

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di aperture di grandi dimensioni o in numero elevato (anche se tamponate)

Elevata snellezza (rapporto altezza/larghezza)

Numero degli indicatori di vulnerabilità o dei presidi antisismici	Giudizio dell'efficacia	$v_k$
almeno 1	3	3
almeno 2	2	
1	2	2
almeno 2	1	
1	1	1
Nessuno	0	0

## 4 - PROTIRO - NARTECE

Lesioni negli archi o nella trabeazione per rotazione delle colonne – Distacco dalla facciata – Martellamento

### *Presidi antisismici*

Presenza di catene

Presenza di colonne/pilastrini di adeguata dimensione

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di elementi spingenti (archi, volte)

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2}$$

## 5 - RISPOSTA TRASVERSALE DELL'AULA

Lesioni negli arconi (con eventuale prosecuzione nella volta) – Rotazioni delle pareti laterali – Lesioni a taglio nelle volte – Fuori piombo e schiacciamento nelle colonne

### *Presidi antisismici*

Presenza di paraste o contrafforti esterni

Presenza di corpi annessi adiacenti

Presenza di catene trasversali

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di pareti con elevata snellezza

Presenza di volte e archi

## 6 - MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI LATERALI (RISPOSTA LONGITUDINALE)

Lesioni inclinate (singole o incrociate) – Lesioni in corrispondenza di discontinuità nella muratura

### *Presidi antisismici*

- Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità
- Presenza di buoni architravi nelle aperture
- Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

### *Indicatori di vulnerabilità*

- Presenza di grandi aperture o di ampie zone con muratura di limitato spessore
- Cordoli in c.a. molto rigidi, copertura pesante in c.a.

Numero degli indicatori di vulnerabilità o dei presidi antisismici	Giudizio dell'efficacia	$v_k$
almeno 1	3	3
almeno 2	2	
1	2	2
almeno 2	1	
1	1	1
Nessuno	0	0

## 7 - RISPOSTA LONGITUDINALE DEL COLONNATO NELLE CHIESE A PIÙ NAVATE

Lesioni negli archi o negli architravi longitudinali – Schiacciamento e/o lesioni alla base dei pilastri  
 – Lesioni a taglio nelle volte delle navate laterali

### *Presidi antisismici*

- Presenza di catene longitudinali
- Presenza di contrafforti in facciata

### *Indicatori di vulnerabilità*

- Presenza di volte pesanti nella navata centrale
- Copertura pesante in c.a., cappe armate di significativo spessore nelle volte

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2}$$

## 8 - VOLTE DELLA NAVATA CENTRALE

Lesioni nelle volte dell'aula centrale – Sconnessioni delle volte dagli arconi

### *Presidi antisismici*

- Presenza di catene in posizione efficace
- Presenza di rin fianchi o frenelli

### *Indicatori di vulnerabilità*

- Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura
- Volte in foglio, specialmente se su campate di grande luce
- Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

# Indice di vulnerabilità (PREVISIONALE)

DPCM 9/02/2011, allegato C

## 9 - VOLTE DELLE NAVATE LATERALI

Lesioni nelle volte o sconnessioni dagli arconi o dalle pareti laterali

### *Presidi antisismici*

Presenza di catene in posizione efficace

Presenza di rinfianchi o frenelli

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura

Volte in foglio, specialmente se su campate di grande luce

Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

Numero degli indicatori di vulnerabilità o dei presidi antisismici	Giudizio dell'efficacia	$v_k$
almeno 1	3	3
almeno 2	2	
1	2	2
almeno 2	1	
1	1	1
Nessuno	0	0

## 10 - RIBALTAMENTO DELLE PARETI DI ESTREMITÀ DEL TRANSETTO

Distacco della parete frontale dalle pareti laterali – Ribaltamento o disgregazioni del timpano in sommità

### *Presidi antisismici*

Presenza di catene longitudinali

Presenza di efficaci elementi di contrasto (contrafforti, corpi addossati, altri edifici)

Buon collegamento con la copertura (travi-catena, controventi)

Ammorsamento di buona qualità tra la parete frontale ed i muri laterali

Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di cordoli rigidi, travi di colmo in c.a., copertura pesante

Presenza di grandi aperture nella parete frontale (rosone) e/o in quelle laterali

Presenza di una sommità a vela di grande dimensione

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2}$$

## 11 - MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI DEL TRANSETTO

Lesioni inclinate (singole o incrociate) – Lesioni attraverso discontinuità

### *Presidi antisismici*

Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità

Presenza di buoni architravi nelle aperture

Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante

Presenza di grandi aperture o di ampie zone con muratura di limitato spessore

## 12 - VOLTE DEL TRANSETTO

Lesioni nelle volte o sconessioni dagli arconi e dalle pareti laterali

### *Presidi antisismici*

Presenza di catene in posizione efficace

Presenza di rinfianchi o frenelli

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura

Volte in foglio, specialmente se su campate di grande luce

Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

Numero degli indicatori di vulnerabilità o dei presidi antisismici	Giudizio dell'efficacia	$v_k$
almeno 1	3	3
almeno 2	2	
1	2	2
almeno 2	1	
1	1	1
Nessuno	0	0

## 13 - ARCHI TRIONFALI

Lesioni nell'arco – Scorrimento di conci – Schiacciamento o lesioni orizzontali alla base dei piedritti

### *Presidi antisismici*

Pareti di contrasto efficaci (basso rapporto luce/larghezza aula, transetto, altri corpi di fabbrica)

Presenza di una catena in posizione efficace

Conci di buona fattura e/o adeguato spessore dell'arco

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di copertura pesante in c.a.

Presenza di cupola o tiburio

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2}$$

## 14 - CUPOLA - TAMBURO/TIBURIO

Lesioni nella cupola (ad arco) con eventuale prosecuzione nel tamburo

### *Presidi antisismici*

Presenza di una cerchiatura esterna, anche a più livelli

Presenza nel tamburo di contrafforti esterni o paraste

Cupola direttamente impostata sugli archi trionfali (assenza del tamburo)

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di grandi aperture nel tamburo

Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura

## 15 - LANTERNA

Lesioni nel cupolino della lanterna – Rotazioni o scorrimenti dei piedritti

### *Presidi antisismici*

Presenza di catene o di una cerchiatura esterna

Presenza di paraste o contrafforti

Dimensioni contenute rispetto a quelle della cupola

### *Indicatori di vulnerabilità*

Lanterna di elevata snellezza, con grandi aperture e piccoli pilastri

# Indice di vulnerabilità (PREVISIONALE)

## 16 - RIBALTAMENTO DELL'ABSIDE

Lesioni verticali o arcuate nelle pareti dell'abside – Lesioni verticali negli absidi poligonali – Lesione ad U negli absidi semicircolari

### *Presidi antisismici*

Presenza di cerchiatura (semicircolare e poligonale) o catene (rettangolare)

Presenza di efficaci elementi di contrasto (contrafforti, corpi addossati)

Presenza di copertura controventata, non spingente

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di un forte indebolimento per la presenza di aperture (anche tamponate) nelle pareti

Presenza di volte spingenti

Cordoli rigidi, copertura pesante, puntoni di falda in c.a

## 17 - MECCANISMI DI TAGLIO NEL PRESBITERIO O NELL'ABSIDE

Lesioni inclinate (singole o incrociate) – Lesioni in corrispondenza di discontinuità murarie

### *Presidi antisismici*

Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità

Presenza di buoni architravi nelle aperture

Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante

Presenza di grandi aperture o di ampie zone con muratura di limitato spessore

## 18 - VOLTE DEL PRESBITERIO O DELL'ABSIDE

Lesioni nelle volte o sconnessioni dagli arconi o dalle pareti laterali

### *Presidi antisismici*

Presenza di catene in posizione efficace

Presenza di rinfianchi o frenelli

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura

Volte in foglio, specialmente se su campate di grande luce

Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

## 19 - MECCANISMI NEGLI ELEMENTI DI COPERTURA - PARETI LATERALI DELL'AULA

Lesioni vicine alle teste delle travi lignee, scorrimento delle stesse – Sconnessioni tra cordoli e muratura – Movimenti significativi del manto di copertura

### *Presidi antisismici*

Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

Presenza di collegamenti delle travi alla muratura

Presenza di controventi di falda (tavolato incrociato o tiranti metallici)

Presenza di buone connessioni tra gli elementi di orditura della copertura

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di copertura staticamente spingente

Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante

DPCM 9/02/2011, allegato C

Numero degli indicatori di vulnerabilità o dei presidi antisismici	Giudizio dell'efficacia	$v_k$
almeno 1	3	3
almeno 2	2	
1	2	2
almeno 2	1	
1	1	1
Nessuno	0	0

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2}$$

# Indice di vulnerabilità (PREVISIONALE)

## 20 - MECCANISMI NEGLI ELEMENTI DI COPERTURA – TRANSETTO

Lesioni vicine alle teste delle travi lignee, scorrimento delle stesse – Sconnessioni tra i cordoli e muratura – Movimenti significativi del manto di copertura

### *Presidi antisismici*

- Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)
- Presenza di collegamenti delle travi alla muratura
- Presenza di controventi di falda (tavolato incrociato o tiranti metallici)
- Presenza di buone connessioni tra gli elementi di orditura della copertura

### *Indicatori di vulnerabilità*

- Presenza di copertura staticamente spingente
- Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante

## 21 - MECCANISMI NEGLI ELEMENTI DI COPERTURA – ABISDE E PRESBITERIO

Lesioni vicine alle teste delle travi lignee, scorrimento delle stesse – Sconnessioni tra i cordoli e muratura – Movimenti significativi del manto di copertura

### *Presidi antisismici*

- Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)
- Presenza di collegamenti delle travi alla muratura
- Presenza di controventi di falda (tavolato incrociato o tiranti metallici)
- Presenza di buone connessioni tra gli elementi di orditura della copertura

### *Indicatori di vulnerabilità*

- Presenza di copertura staticamente spingente
- Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante

## 22 - RIBALTAMENTO DELLE CAPPELLE

Distacco della parete frontale dalle pareti laterali

### *Presidi antisismici*

- Presenza di efficaci elementi di contrasto (contrafforti, edifici addossati)
- Presenza di cerchiatura o incatenamento
- Ammorsamento di buona qualità tra la parete frontale ed i muri laterali

### *Indicatori di vulnerabilità*

- Presenza di forte indebolimento per la presenza di aperture nelle pareti

DPCM 9/02/2011, allegato C

Numero degli indicatori di vulnerabilità o dei presidi antisismici	Giudizio dell'efficacia	$v_k$
almeno 1	3	3
almeno 2	2	
1	2	2
almeno 2	1	
1	1	1
Nessuno	0	0

$$i_V = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} p_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} p_k} + \frac{1}{2}$$

## 23 - MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI DELLE CAPPELLE

Lesioni inclinate (singole o incrociate) – Lesioni in corrispondenza di discontinuità murarie

### *Presidi antisismici*

- Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità
- Presenza di buoni architravi nelle aperture
- Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

### *Indicatori di vulnerabilità*

- Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante
- Presenza di grandi aperture (anche tamponate), muratura di limitato spessore

# Indice di vulnerabilità (PREVISIONALE)

DPCM 9/02/2011, allegato C

## 24 - VOLTE DELLE CAPPELLE

Lesioni nelle volte o sconnessioni dalle pareti laterali

*Presidi antisismici*

- Presenza di catene in posizione efficace
- Presenza di rinfianchi o frenelli

*Indicatori di vulnerabilità*

- Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura
- Volte in foglio, specialmente se molto ribassate
- Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

## 25 - INTERAZIONI IN PROSSIMITÀ DI IRREGOLARITÀ PLANO-ALTIMETRICHE

Movimento in corrispondenza di discontinuità costruttive - Lesioni nella muratura per martellamento

*Presidi antisismici*

- Presenza di un'adeguata connessione tra le murature di fasi diverse
- Presenza di catene di collegamento

*Indicatori di vulnerabilità*

- Presenza di un'elevata differenza di rigidità tra i due corpi
- Possibilità di azioni concentrate trasmesse dall'elemento di collegamento

## 26 - AGGETTI (VELA, GUGLIE, PINNACOLI, STATUE)

Evidenza di rotazioni permanenti o scorrimento - Lesioni

*Presidi antisismici*

- Presenza di perni di collegamento con la muratura o elementi di ritegno
- Elementi di limitata importanza e dimensione
- Muratura monolitica (a conci squadrate o comunque di buona qualità)

*Indicatori di vulnerabilità*

- Elementi di elevata snellezza
- Appoggio in falso sulle murature sottostanti in falso
- Posizione asimmetrica rispetto all'elemento sottostante (specie se l'aggetto ha notevole massa)

Numero degli indicatori di vulnerabilità o dei presidi antisismici	Giudizio dell'efficacia	v <sub>k</sub>
almeno 1	3	3
almeno 2	2	
1	2	2
almeno 2	1	
1	1	1
Nessuno	0	0

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2}$$

# Indice di vulnerabilità (PREVISIONALE)

## 27- TORRE CAMPANARIA

Lesioni vicino allo stacco dal corpo della chiesa – Lesioni a taglio o scorrimento – Lesioni verticali o arcuate (espulsione di uno o più angoli)

DPCM 9/02/2011, allegato C

*Presidi antisismici*

- Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità
- Presenza di catene ai diversi ordini
- Presenza di adeguata distanza dalle pareti della chiesa (se adiacente)
- Presenza buon collegamento con le pareti della chiesa (se inglobata)

*Indicatori di vulnerabilità*

- Presenza di aperture significative su più livelli
- Vincolo asimmetrico sulle murature alla base (torre inglobata)
- Appoggio irregolare a terra della torre (presenza di archi su alcuni lati, pareti a sbalzo)



## 28 - CELLA CAMPANARIA

Lesioni negli archi – Rotazioni o scorrimenti dei piedritti

*Presidi antisismici*

- Presenza di piedritti tozzi e/o archi di luce ridotta
- Presenza di catene o cerchiature

*Indicatori di vulnerabilità*

- Presenza di copertura pesante o di altre masse significative
- Presenza di copertura spingente

Numero degli indicatori di vulnerabilità o dei presidi antisismici	Giudizio dell'efficacia	v <sub>k</sub>
almeno 1	3	3
almeno 2	2	
1	2	2
almeno 2	1	
1	1	1
Nessuno	0	0

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2}$$