

*Autori:* Stefano PODESTÀ, Anna BRIGNOLA, Emanuela CURTI, Sonia PARODI

Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni e del Territorio, Università di  
Genova

# L'AQUILA, CHIESA DI SS. MARCIANO E NICANDRO

## VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE E LA RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO DEL PATRIMONIO CULTURALE

### 1. Premessa

Nella presente relazione è riportata, a titolo esemplificativo, la verifica sismica della Chiesa di SS. Marciano e Nicandro secondo i metodi proposti dalle *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*, armonizzate con il D.M. del 14 gennaio 2008 – *Norme Tecniche per le Costruzioni*. Il manufatto, situato nel centro storico de L'Aquila, ha subito gravi danni a seguito del terremoto del 6 aprile 2009. Le analisi sono state condotte in riferimento alle condizioni del manufatto antecedenti a tale evento al fine di evidenziare come la metodologia proposta nelle Linee Guida avrebbe consentito di ottenere una riduzione significativa della vulnerabilità e conseguentemente del livello di danno, attraverso la definizione di interventi comunque compatibili con la tutela del bene stesso.

Nell'ottica di fornire un'esemplificazione dell'iter procedurale proposto dalle Linee Guida la verifica è stata condotta secondo i diversi livelli di valutazione del rischio (LV1-LV3). In particolare per quanto riguarda la valutazione complessiva del bene si è adottato un'analisi per macroelementi estesa a tutti i cinematismi di collasso potenzialmente attivabili, individuati in relazione alle peculiarità costruttive del manufatto.

### 2. Conoscenza del manufatto

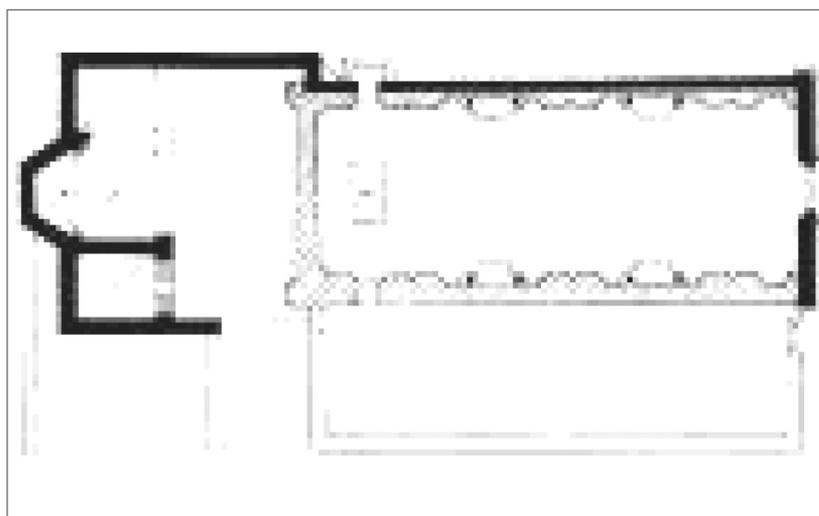
La conoscenza di una costruzione storica costituisce un presupposto fondamentale al fine di ottenere una attendibile valutazione della sicurezza sismica (Linee Guida - §4.1.). Il percorso di conoscenza del manufatto è stato sviluppato con la finalità di approfondire differenti aspetti (identificazione della costruzione – Linee Guida §4.1.2; rilievo

geometrico - Linee Guida §4.1.4; analisi storica degli eventi e degli interventi subiti - Linee Guida §4.1.5; rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione Linee Guida §4.1.6; caratterizzazione meccanica dei materiali - Linee Guida §4.1.7) al fine di ottenere un livello di conoscenza adeguato per l'applicazione dei modelli di vulnerabilità proposti dalle Linee Guida.

Analizzando le principali informazioni reperite, è emerso come il quadro di danneggiamento del manufatto possa essere in gran parte compreso attraverso l'analisi delle diverse trasformazioni subite dal manufatto nel corso della sua storia.

La chiesa di SS. Marciano e Nicandro è stata fondata nel 1256 ad opera dei castellani di Roio, ma venne interamente ricostruita dieci anni più tardi quando divenne chiesa capoquarto secondo la nuova suddivisione in quattro quartieri della città. La chiesa duecentesca era costituita, oltre che dall'aula ad una navata, anche da un braccio trasversale poco sporgente costituito da tre absidi rettangolari voltati, di cui quello centrale aggettante dai laterali mediante alveo volumetrico esagonale. Un arco trionfale divideva lo spazio della navata da quello del vano trasversale (Figura 1).

Figura 1.  
Ricostruzione della  
pianta della Chiesa  
duecentesca.

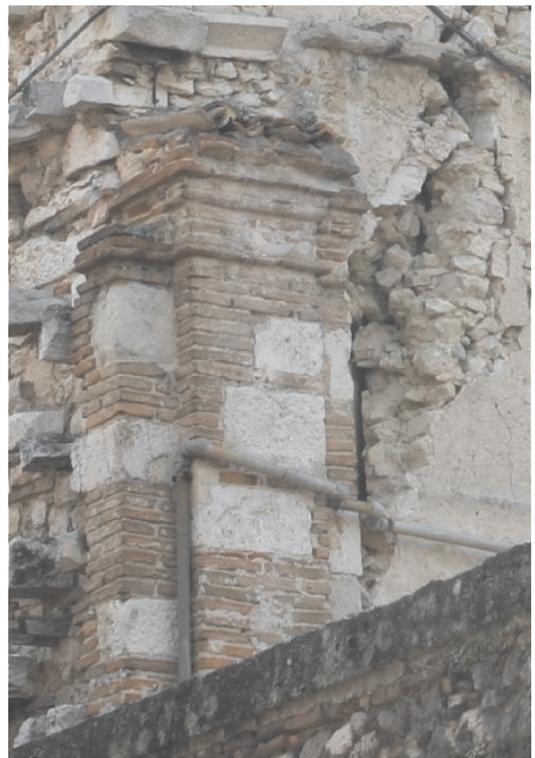


Nel corso dei secoli successivi la chiesa fu abbellita sia all'esterno che all'interno ed assunse un aspetto barocco. Il terremoto del 1703 la distrusse quasi completamente, determinando, a seguito della ricostruzione, una drastica trasformazione volumetrica. In seguito al sisma venne, infatti, riedificata l'aula e fu realizzata una tamponatura provvisoria a ridosso dell'arco trionfale, in attesa di ricostruire interamente la porzione absidale della chiesa. Nonostante la volontà della prosecuzione della ricostruzione sia attestata dalle morse presenti all'esterno attorno all'arco tamponato (costituiti anche da pezzi lapidei provenienti dalle antiche bifore e dall'arredo scultoreo frantumato nel terremoto - Figura 2) e dalle paraste che dall'orto della chiesa si vedono predisposte a sostenere quelle che avrebbero dovuto essere le arcate traverse del transetto alla base della cupola, essa non fu mai realizzata (Figura 3).

Figura 2.  
Morse(a) e paraste (b) a testimonianza della volontà di completare l'opera di ricostruzione a seguito dei danni del terremoto del 1703.

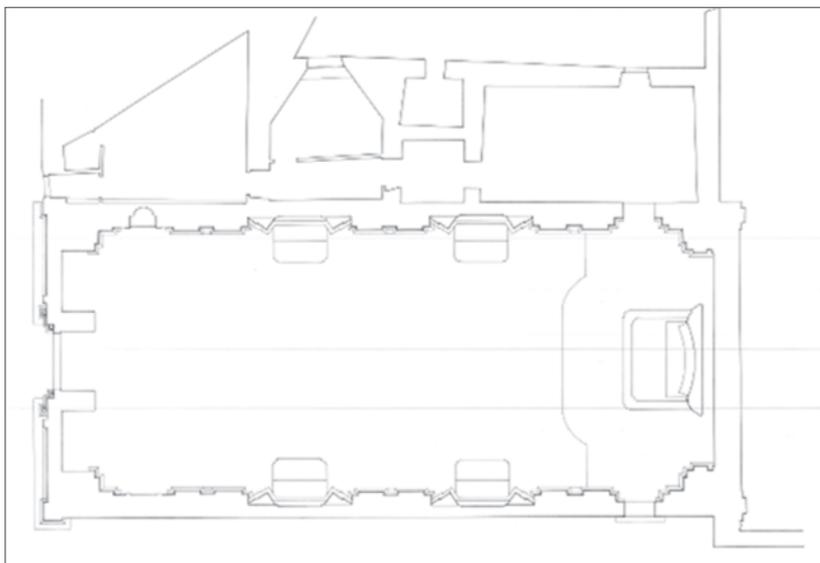


(a)



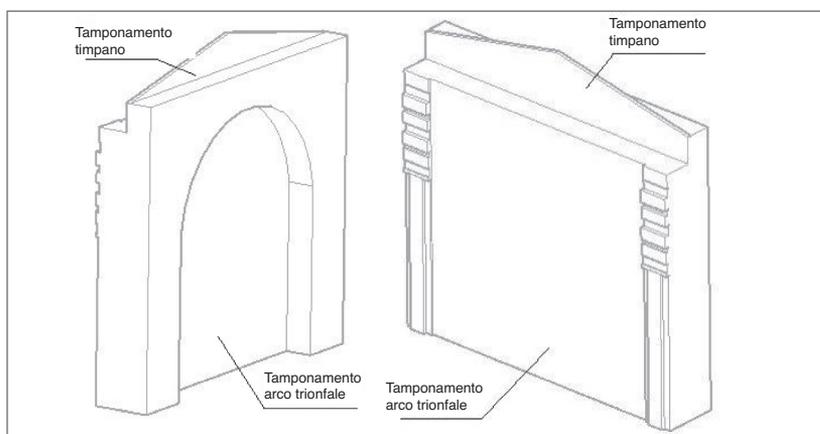
(b)

Figura 3. Attuale conformazione in pianta della chiesa di SS. Marciano e Nicandro.



In particolare il tamponamento posto in corrispondenza dell'arco trionfale è realizzato, sino alla quota estradossale della chiave dell'arco trionfale, da una parete posta in corrispondenza del filo esterno dell'arco trionfale stesso unicamente giustapposta alle murature d'ambito e la chiusura del timpano è costituita da una tamponatura in mattoni molto sottile (Figura 4).

Figura 4. Parete absidale: schematizzazione dei tamponamenti presenti.



Anche la facciata fu ricostruita dopo l'evento sismico del 1703 inglobando il tratto inferiore preesistente e nella seconda metà degli anni trenta del '900 fu effettuato un completamento della parte superiore con terminazione piana [Fiorani, 2010].

In relazione al danneggiamento rilevato a seguito del terremoto del 6 aprile 2009 la chiesa ha principalmente evidenziato lesioni di gravissima entità associabili ad una risposta trasversale dell'edificio: il danno nel piano della facciata si è manifestato con lesioni di grave entità particolarmente evidenti in corrispondenza del rosone (Figura 5), disgregando le sottili lastre poste a simulare il paramento in conci squadrati; l'arco trionfale si trova in una situazione prossima al collasso per la formazione di quattro cerniere plastiche (Figura 6) e nella parete di tamponamento ad esso addossato si riscontrano lesioni a taglio di grave entità, così come nella vela campanaria (disposta nella zona absidale parallelamente al piano della facciata) (Figura 8). All'interno della chiesa sono visibili lesioni sulle pareti laterali e sulle paraste interne, ad andamento pressoché orizzontale, in corrispondenza delle aperture presenti, associabili alla risposta trasversale dell'aula (Figura 7).

Figura 5. Danno riconducibile alla risposta nel piano della facciata.



Figura 6.  
Danneggiamento  
dell'arco trionfale.



Figura 7. Risposta  
trasversale dell'aula.



Figura 8.  
Danneggiamento  
nella vela  
campanaria.

La risposta dell'edificio nella direzione longitudinale, nonostante la bidirezionalità dell'evento sismico aquilano, ha manifestato livelli di danno certamente più limitati, determinando l'attivazione dei meccanismi solo nei casi in cui si sono riscontrate particolari vulnerabilità, come per il tamponamento addossato all'arco trionfale che, essendo completamente scollegato dall'arco stesso e dalle pareti laterali della chiesa, ha subito parziali crolli fuori-piano (Figura 9). Il meccanismo di ribaltamento è stato, inoltre, facilitato dall'azione di martellamento della copertura che è costituita da travetti in cemento armato e volterrane (Figura 10). Analogamente ad altre chiese del centro storico aquilano (i.e Santa Maria

Paganica, San Biagio ad Amiternum), la realizzazione della nuova copertura in cemento armato è stata effettuata al di sopra delle originarie capriate lignee (Figura 10) che mantengono la sola funzione di sostegno del controsoffitto (Figura 11).

Figura 9.  
Danneggiamenti in  
corrispondenza  
dell'arco trionfale.



Figura 10.  
Copertura della  
chiesa: nuova  
struttura in  
cemento armato e  
travetti lignei della  
copertura  
originaria.





Figura 11.  
Controsoffitto  
ligneo

A seguito della ricostruzione successiva al 1703 vennero realizzate nuove decorazioni all'interno della chiesa ed in particolare un sistema di paraste corinzie appaiate che divide le pareti in quattro episodi architettonici e un controsoffitto piano decorato. Per il ruolo di chiesa capoquarto, l'apparato decorativo della chiesa è uno dei più preziosi della città: degni di rilievo sono gli affreschi con Santa Caterina di Alessandria del XIV secolo e quelli rinascimentali sulle storie dei santi Marciano e Nicandro, che hanno manifestato un incremento di danneggiamento dopo il sisma.

Tale aspetto evidenzia come sia necessario, quando si opera su manufatti in cui sono presenti apparati decorativi fissi o mobili di definire opportuni stati limite per la preservazione degli apparati decorativi in fase di prevenzione sismica. La definizione del periodo di riferimento deve essere assunto tenendo conto del numero dei cicli di controllo

necessari in  $V_R$ , che dovranno essere definiti dall'Amministrazione deputata alla tutela (Linee Guida - § 2.4).



Figura 12. Particolare di affresco sulla storia dei santi Marcelliano e Nicandro: confronto del danno pre (a) e post-sisma (b).

Nelle successive analisi, è stata assunta una categoria di suolo pari a B, mentre si sottolinea come la topografia del sito (pianeggiante) non evidenzia la necessità di tenere in conto effetti di amplificazione morfologici.

### 2.1 Livello di conoscenza e fattore di confidenza

In relazione al livello di conoscenza del manufatto (§2), è stato calcolato il fattore di confidenza  $F_c$  (Linee Guida – § 4.2). Esso è stato ottenuto attraverso l'assegnazione dei fattori di confidenza parziali ( $F_{c_k}$ , con  $k=1, 2, 3, 4$ ) riportati in Tabella 4.1 delle Linee Guida, associati alle quattro categorie d'indagine ed al livello di approfondimento in esse raggiunto (Tabella 1). In particolare, per fattori  $F_{c_1}$  (rilievo geometrico) e  $F_{c_2}$  (identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica) sono stati assunti valori pari a 0, mentre per il fattore  $F_{c_3}$  (proprietà meccaniche dei materiali) è stato considerato il valore

massimo pari a 0,12. In merito al terreno ed alle fondazioni, l'indisponibilità di dati geotecnici puntuali per il sito indagato e sulle strutture fondazionali ha determinato l'assunzione di un coefficiente parziale  $F_{c4}$  pari a 0,06. Tuttavia, in relazione al metodo di analisi adottato per valutare la vulnerabilità sismica dei diversi macroelementi, dal momento che le informazioni sul terreno e le fondazioni non hanno alcuna relazione con l'attivazione dei diversi cinematismi, il fattore parziale di confidenza  $F_{c4}$  è stato assunto pari a 0. I valori dei fattori parziali di confidenza assunti per la valutazione della sicurezza sismica nello stato attuale sono riportati in Tabella 1.

Rilievo geometrico	rilievo geometrico completo, con restituzione grafica dei quadri fessurativi e deformativi	$F_{c1} = 0$
Identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica	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	$F_{c3} = 0.12$
Terreno e fondazioni	le informazioni sul terreno e le fondazioni non hanno alcuna relazione con lo specifico meccanismo di collasso	$F_{c4} = 0$

Il fattore di confidenza  $F_c$  risulta (Linee Guida – equazione 4.1):

$$F_c = 1 + \sum_{k=1}^4 F_{ck} = 1.12 \quad (1)$$

Tabella 1.  
Definizione del  
Fattore di  
Confidenza  $F_c$

### 3 Definizione dell'azione sismica

Secondo quanto previsto nelle Linee Guida al punto 2.4, l'azione sismica di riferimento vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento  $V_R$  così definito:

$$V_R = V_N C_U \quad (2)$$

dove  $V_N$  è la vita nominale cui viene riferita la valutazione della sicurezza e  $C_U$  la classe d'uso (Linee Guida - § 2.4; D.M. 14 gennaio 2008 - 2.4.1 e 2.4.2; Circolare 2 febbraio 2009, n°617 - C2.4.1 e C2.4.2), assegnata sulla base delle caratteristiche del bene e del tipo d'uso.

In particolare per il bene in esame i parametri assunti e la conseguente vita di riferimento sono riportati in Tabella 2.

Tabella 2.  
Parametri per la  
definizione della  
vita di riferimento.

Vita nominale $V_N$ [anni]	50
Classe d'uso $C_u$ [-]	II
Vita di riferimento $V_R$ [anni]	50

In relazione, quindi, al periodo di riferimento  $V_R$  ed allo stato limite considerato, a cui è associata una determinata probabilità di superamento  $P_{VR}$  nella vita di riferimento, può essere valutato il periodo di ritorno di riferimento dell'azione sismica  $T_R$ :

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1-P_{VR})} \quad (3)$$

In Tabella 3 sono riportati i valori di periodo di riferimento dell'azione sismica  $T_R$  per lo Stato Limite di Danno (SLD) e lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV) valutati con riferimento alla chiesa in oggetto (punti 2.3 e 2.4 delle Linee Guida).

Tabella 3.  
Valori di  
riferimento  
dell'azione sismica  
per i differenti Stati  
Limite analizzati.

Stato Limite	SLD	SLV
PVR (%)	0,63	0,10
TR (anni)	50	475

Nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 gennaio, 2008) “...le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $P_{VR}$ , a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale ...”:

- $a_g$  accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F_0$  valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $T_c^*$  periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Per la stima del valore dell'accelerazione di riferimento del sito  $a_g$ , le NTC hanno adottato i valori di pericolosità definiti dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (GdL MPS, 2004: <http://zonesismiche.mi.ingv.it>) per l'intero territorio nazionale su un reticolo di lato pari a circa 5 km. Nell'Allegato A delle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008) sono fornite le indicazioni necessarie per ottenere i parametri dell'azione sismica per una generica coordinata geografica ed un generico periodo di ritorno.

In Tabella 4 sono riportati i valori di  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$  per il sito in esame con riferimento ai periodi di ritorno riportati in Tabella 3.

	SLD	SLV
$T_R$ (anni)	50	475
$a_g$ (g)	0.104	0.261
$F_0$ (-)	2.33	2.36
$T_c^*$ (sec)	0.28	0.35

Tabella 4.  
Valori di  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$  per differenti periodi di ritorno in riferimento alla Chiesa di SS. Marciano e Nicandro.

In Tabella 5 sono inoltre riportati i valori di  $S_c$  e  $C_c$ , dipendenti dalla tipologia di suolo e dallo stato limite considerato, necessari per la

definizione degli spettri di risposta elastici in accelerazione così come previsto dalle NTC (D.M. 14 gennaio 2008).

	SLD	SLV
$T_R$ (anni)	50	475
Categoria Suolo	B	B
Categoria Topografica	T1	T1
$S_S$ (-)	1.20	1.15
$C_C$ (-)	1.42	1.36
$S_T$ (-)	1	1
$S$ (-)	1.20	1.15
$a_g S$ (g)	0.12	0.30

Tabella 5.  
Parametri  
di amplificazione  
stratigrafica  
e topografica  
e valori  
di accelerazione  
al suolo.

#### 4 Modello di Valutazione a Livello Territoriale - LV1

Per ottenere un'indicazione iniziale del livello di vulnerabilità nello stato attuale dell'intero manufatto, si è sviluppato preliminarmente un'analisi secondo il livello di valutazione LV1.

L'utilizzo di tale livello di analisi, sebbene risulti principalmente idoneo per lo studio della vulnerabilità a scala territoriale (Linee Guida – § 1.1), ha fornito una preliminare valutazione della vulnerabilità globale del manufatto attraverso una stima dell'accelerazione al suolo corrispondente al raggiungimento dei diversi stati limite. In particolare l'analisi è stata sviluppata attraverso l'applicazione del modello semplificato per la valutazione dell'accelerazione corrispondente a differenti stati limite (SLV e SLD) per la tipologia “Chiese, luoghi di culto ed altre strutture con grandi aule, senza orizzontamenti intermedi” (Linee Guida – § 5.4.3). Sulla base delle rielaborazioni delle informazioni contenute nel modello di valutazione della vulnerabilità (Linee Guida - Allegato C) relativa al

caso in esame (riportata in Allegato 1 della presente relazione) è stato ottenuto un indice di vulnerabilità  $i_v$  pari a 0.70, a cui corrispondono i seguenti valori di accelerazione al suolo, relativi allo stato limite di danno (SLD) ed allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) (Linee Guida – equazioni 5.16 e 5.17):

$$a_{\text{SLD}} \cdot S = 0.025 \cdot 1.8^{2.75 - 3.44i_v} = 0.031 \frac{\text{m}}{\text{S}^2}$$

$$a_{\text{SLV}} \cdot S = 0.025 \cdot 1.8^{5.1 - 3.44i_v} = 0.122 \frac{\text{m}}{\text{S}^2} \quad (4)$$

I periodi di ritorno corrispondenti al raggiungimento degli stati limite considerati (SLD e SLV) possono essere ottenuti interpolando tra i valori noti relativi ai periodi di ritorno predefiniti (Linee Guida - eq. 5.20). In particolare per il caso in esame esse risultano:

$$\begin{aligned} T_{\text{SLD}} &< 30 \text{anni} \\ T_{\text{SLV}} &= 39 \text{anni} \end{aligned} \quad (5)$$

Si sottolinea come nella definizione dei periodi di ritorno è considerato il valore del fattore di confidenza  $F_c$ , definito in funzione del livello di approfondimento raggiunto nella conoscenza della costruzione (§ 2). In riferimento allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita, sulla base dei risultati ottenuti, è possibile calcolare l'indice di sicurezza sismico  $I_s$  (Linee Guida – equazione 2.3) ed il fattore di accelerazione  $f_a$  (Linee Guida – equazione 2.5) (Linee Guida - § 2.4):

$$\begin{aligned} I_{\text{SLV}} &= \frac{T_{\text{SLV}}}{T_{\text{R,SLV}}} = 0,10 \\ f_{a,\text{SLV}} &= \frac{a_{\text{SLV}}}{a_{\text{g,SLV}}} = 0,39 \end{aligned} \quad (6)$$

Dove  $T_{\text{R,SLV}}$  e  $a_{\text{g,SLV}}$  sono rispettivamente il periodo e l'accelerazione sismica di riferimento del sito.

Esempi applicativi – L'Aquila, chiesa di SS. Marciano e Nicandro

I bassi valori degli indici sopra riportati testimoniano l'elevata vulnerabilità della chiesa. Si evidenzia in particolare che i meccanismi ai quali è associata una maggiore vulnerabilità siano: il meccanismo di taglio nelle pareti laterali (risposta longitudinale), il ribaltamento dell'abside, i meccanismi di taglio nelle pareti del presbiterio e dell'abside e l'interazione in prossimità di irregolarità plano-altimetriche.

## 5 Modello di Valutazione di Dettaglio LV3

Al fine di ottenere una valutazione della vulnerabilità sismica del manufatto nello stato attuale si riporta l'analisi della chiesa secondo il livello di valutazione LV3. Essa è stata condotta attraverso lo sviluppo di modelli locali applicati in modo generalizzato a tutti i cinematismi di collasso potenzialmente attivabili in relazione alle peculiarità costruttive del manufatto (Linee Guida – § 2.2) utilizzando i metodi dell'analisi limite dell'equilibrio secondo un approccio cinematico (Linee Guida – § 5.4.3). In particolare è stato applicato il metodo d'analisi statica lineare e non lineare, attraverso rispettivamente l'analisi cinematica lineare e non lineare (Linee Guida – § 5.2.2 e 5.2.4) secondo i procedimenti descritti nel dettaglio nell'Appendice C8A.4 della Circolare n° 617 del 2 febbraio 2009 *Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008.*

### 5.1 Individuazione dei meccanismi di danno

L'analisi della vulnerabilità sismica complessiva del manufatto è stata condotta "per parti" attraverso l'analisi dei possibili meccanismi di danno. Essi sono stati individuati attraverso la lettura del comportamento manifestato a seguito del sisma (meccanismi attivati) e in funzione a quelli che, sulla base della conformazione del fabbricato e delle sue caratteristiche costruttive, sono stati ritenuti possibili.

In particolare nella chiesa in esame, in relazione alla sua particolare conformazione e in funzione sia alle vulnerabilità riscontrate, sia al comportamento post sismico osservato, sono stati individuati i seguenti

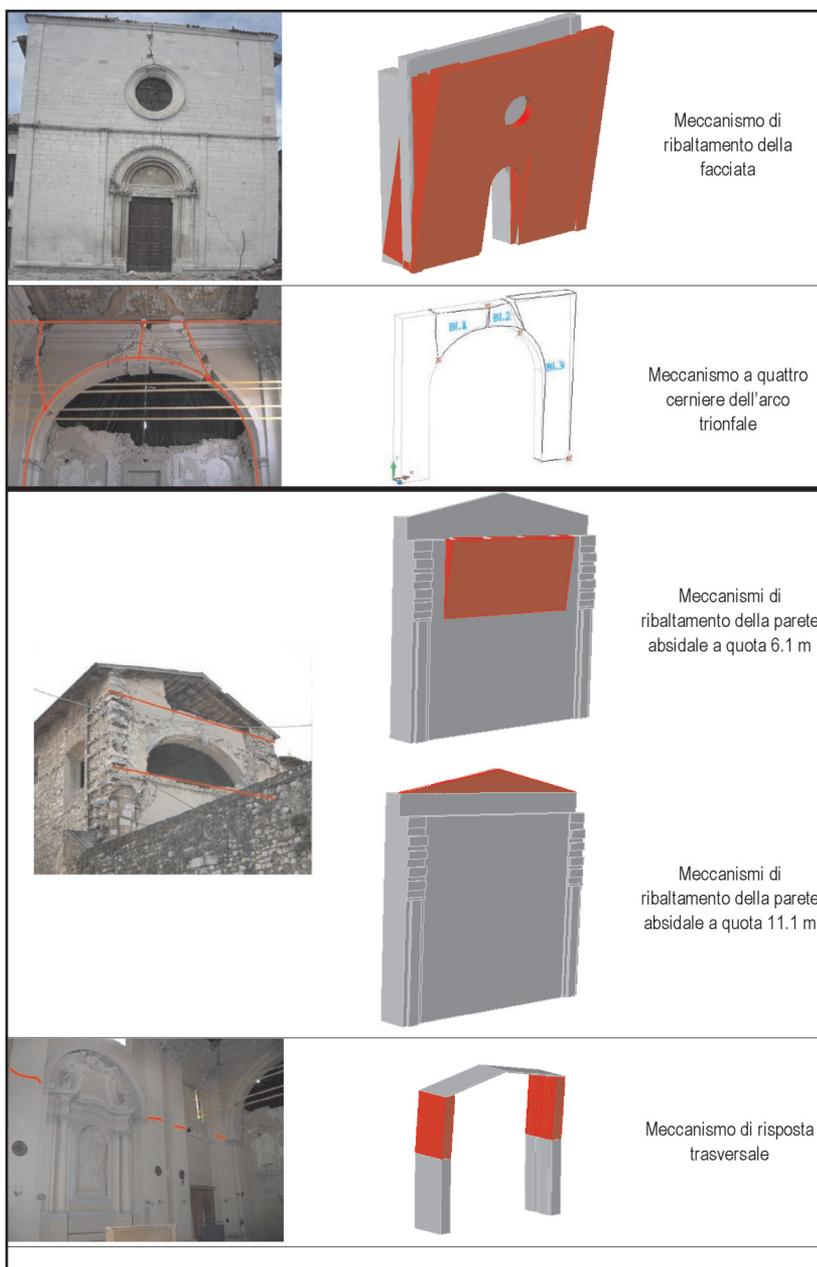


Figura 13.  
Meccanismi di danno analizzati.

macroelementi a cui è possibile associare i differenti meccanismi di danno:

- facciata: meccanismo di ribaltamento fuori piano;
- arco trionfale: risposta nel piano;
- abside: meccanismi di risposta fuori piano;
- risposta trasversale dell'aula.

Il moltiplicatore orizzontale  $\alpha_0$  dei carichi è stato calcolato attraverso l'applicazione ai cinematismi analizzati del Teorema dei Lavori Virtuali (Circolare n° 617 del 02-02-2009 - equazione C8A.4.1).

$$\alpha_0 \left( \sum_{i=1}^n P_i \delta_{x,i} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j \delta_{x,j} \right) - \sum_{i=1}^n P_i \delta_{y,i} - \sum_{h=1}^o F_h \delta_h = L_{fi} \quad (7)$$

Dove, nei casi in esame, le forze da applicare ai blocchi rigidi sono rappresentate da:

- $P_i$  generica forza peso applicata al cinematismo: essa rappresenta sia il peso proprio dei blocchi, applicato nel rispettivo baricentro, sia altri carichi verticali che gravano sugli stessi. Nel caso in esame tali forze sono rappresentate dal peso proprio della muratura (considerato applicato in corrispondenza del baricentro e assumendo un peso specifico di 20 kN/m<sup>3</sup>) e, per il meccanismo della facciata e della risposta trasversale dai carichi trasmessi dalla copertura (39 kN – Copertura gravante sulla porzione di muratura laterale della facciata; 59 kN – Copertura gravante su ciascun ritto del sistema resistente della risposta trasversale);
- $P_j$  generica forza peso, non direttamente applicata sui blocchi, la cui massa, per effetto dell'azione sismica, genera una forza orizzontale sugli elementi della catena cinematica, in quanto non efficacemente trasmessa ad altre parti dell'edificio: nel caso in esame tale forza è stata computata nel cinematismo di ribaltamento fuori piano della

facciata al fine di tenere in conto la forza inerziale dovuta alla copertura (il cui peso grava sulle pareti laterali) che in caso di sisma sollecitano la facciata. L'entità della forza è stata valutata in 320 kN;

- $F_h$  generiche azioni esterne agenti sui blocchi rigidi: Nei casi esaminati non sono state rilevate forze appartenenti a questa tipologia;
- $L_{fi}$  generiche azioni interne: esse sono rappresentate, per esempio dalle forze interne generate dall'ingranamento tra i conci murari. Nei casi in esame tale contributo è stato considerato nullo a favore di sicurezza.

Per ottenere il moltiplicatore  $\alpha_0$  è stata assegnata una rotazione virtuale  $\Theta_k$  ad un blocco rigido appartenente alla catena cinematica e sono stati valutati, in funzione di questa e della geometria del cinematismo, gli spostamenti delle diverse forze nella rispettiva direzione. L'accelerazione spettrale di attivazione dei meccanismi analizzati  $a_0^*$  (Circolare n° 617 del 02-02-2009 - equazione C8A.4.4) è stata calcolata nel modo seguente:

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 \cdot g}{e^* F_c} \quad (8)$$

dove  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $e^*$  la frazione di massa partecipante e  $F_c$  il fattore di confidenza (§ 2.1).

La verifica secondo l'analisi cinematica lineare viene condotta in termini di accelerazione, confrontando la capacità  $a_0^*$  del cinematismo definita come sopra riportato, con la domanda sismica come riportato nella tabella seguente:

Elementi isolati o porzione della costruzione comunque appoggiata a terra		Porzione della costruzione posta ad una certa quota	
SLV	SLD	SLV	SLV
$a_0^* \geq \frac{a_g(P_{VR}) \cdot S}{q}$	$a_0^* \geq a_g(P_{VR}) \cdot S$	$a_0^* \geq \begin{cases} \frac{a_g(P_{VR}) \cdot S}{q} \\ \frac{S_e(T_1) \cdot \Psi(z) \cdot \gamma}{q} \end{cases}$	$a_0^* \geq \begin{cases} a_g(P_{VR}) \cdot S \\ S_e(T_1) \cdot \Psi(z) \cdot \gamma \end{cases}$

Per effettuare la verifica secondo l'analisi cinematica non lineare, il

moltiplicatore orizzontale  $\alpha$  dei carichi è stato valutato in riferimento a configurazioni variate della catena cinematica, rappresentative dell'evoluzione del meccanismo e descritte dallo spostamento  $d_k$  di un punto di controllo del sistema.

L'andamento del moltiplicatore orizzontale  $\alpha$  dei carichi in funzione dello spostamento  $d_k$  del punto di controllo della struttura, è stato trasformato in curva di capacità dell'oscillatore equivalente tramite La (8) e la seguente formula:

$$d^* = d_k \frac{\sum_{i=1}^{n+m} P_i \cdot \delta_{x,i}^2}{\delta_{x,k} \sum_{i=1}^{n+m} P_i \cdot \delta_{x,i}} \quad (9)$$

Dove:

- $d_k$  è lo spostamento del punto di controllo
- $n+m$  è il numero delle forze peso le cui masse, per effetto dell'azione sismica, generano forze orizzontali sugli elementi della catena cinematica;
- $\delta_{x,i}$  è lo spostamento virtuale orizzontale del punto di applicazione dell' $i$ -esimo peso  $P_i$ .

La capacità di spostamento relativa allo stato limite di salvaguardia della vita di ciascun cinematisimo è stata valutata sulla curva di capacità (considerando solamente le azioni di cui è verificata la presenza fino al collasso) in corrispondenza del 40% dello spostamento per cui si annulla l'accelerazione spettrale  $a^*$ .

La verifica è stata effettuata confrontando la capacità di spostamento ultimo ( $d_u^*$ ) così definita con la domanda di spostamento ottenuta dallo spettro di spostamento in corrispondenza del periodo secante  $T_s$  calcolato nel modo seguente:

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{d_s^*}{a_s^*}} \quad (10)$$

dove:

- $d_s^*$  è pari al 40% del  $d_u^*$
- $a_s^*$  è l'accelerazione individuata sulla curva di capacità in corrispondenza di  $d_s^*$

Nel caso di cinematismi posti ad una certa quota rispetto al suolo è stato tenuto in conto dell'eventuale amplificazione della domanda dovuta all'effetto filtro operato dalla struttura sull'input, assumendo come domanda di spostamento la massima tra quella riferita allo spettro al suolo e quella ottenuta utilizzando la forma spettrale proposta nella Circolare n° 617 del 02-02-2009 (equazione C8A.4.12)

Nella tabella seguente si riportano i valori della capacità, della domanda e la corrispondente verifica per i cinematismi analizzati secondo l'analisi cinematica lineare e non lineare in riferimento allo Stato Limite di salvaguardia della Vita.

	Analisi cinematica lineare			Analisi cinematica non lineare		
	Accelerazione spettrale [m/sec <sup>2</sup> ]	Domanda [m/sec <sup>2</sup> ]	Verifica	Capacità di spostamento [m]	Domanda [m]	Verifica
Meccanismo di ribaltamento della facciata	0.93	1.50	NO	0.30	0.21	SI
Meccanismo a quattro cerniere dell'arco trionfale	1.38	1.50	NO	0.15	0.12	SI
Meccanismi di ribaltamento della parete absidale a quota 6.1 m	0.82	2.58	NO	0.07	0.11	NO
Meccanismi di ribaltamento della parete absidale a quota 11.1 m	1.26	3.89	NO	0.02	0.08	NO
Meccanismo di risposta trasversale	1.60	2.33	NO	0.17	0.12	NO

Dall'analisi dei risultati ottenuti (Tabella 6) emerge come la chiesa presenti un'elevata vulnerabilità soprattutto nei confronti di meccanismi di ribaltamento fuori piano delle pareti di tamponamento che costituiscono l'abside i quali, infatti, sono gli unici che non risultano verificati in riferimento alla pericolosità attesa anche nel caso di verifica secondo il metodo maggiormente di dettaglio dell'analisi cinematica non lineare. La

Tabella 6.  
Risultati delle analisi in riferimento allo Stato Limite di salvaguardia della Vita

vulnerabilità legata a questi meccanismi, oltre a essere riconducibile alla loro conformazione (pareti sottili) e alla mancanza di ammorsamento con le pareti d'ambito, è anche dovuta al fatto che, essendo posti ad una quota elevata rispetto al suolo, subiscono un'amplificazione della domanda a causa dell'effetto filtro operato dall'intera struttura sull'input al suolo.

I meccanismi della risposta trasversale e dell'arco trionfale, pur non risultando soddisfatti con l'analisi cinematica lineare, appaiono verificati utilizzando l'approccio non lineare di maggior dettaglio. Anche tale aspetto appare in accordo con quanto osservato a seguito del sisma, in quanto nessuno dei meccanismi analizzati è giunto al collasso, mantenendo una risorsa a resistere ai carichi verticali. L'assenza di danno riconducibile ad azioni fuori piano della facciata rispetto a quello presente nell'arco trionfale e nella risposta trasversale può essere ricondotto al fatto che l'azione è stata caratterizzata da un'azione prevalentemente trasversale. In riferimento ai meccanismi di ribaltamento della facciata e di risposta trasversale occorre inoltre sottolineare come questi appaiano particolarmente vulnerabili nei confronti dello stato limite di danno rispetto al quale la verifica non appare soddisfatta (Tabella 7). Tale aspetto si traduce nella formazione di uno stato lesionativo, seppur non di grave entità, anche in occasione di terremoti di intensità contenute (associati al tempo di ritorno dello stato limite di danno).

Tabella 7. Risultati secondo lo Stato Limite di Danno per i meccanismi della facciata e della risposta trasversale.

<b>Analisi cinematica lineare</b>			
	Accelerazione spettrale [m/sec <sup>2</sup> ]	Domanda [m/sec <sup>2</sup> ]	Verifica
Meccanismo di ribaltamento della facciata	0.93	1.25	NO
Meccanismo di risposta trasversale	1.60	1.91	NO

Tabella 7. Risultati secondo lo Stato Limite di Danno per i meccanismi della facciata e della risposta trasversale.

## 6 Possibili interventi di miglioramento sismico

In riferimento alle analisi condotte è emerso come la chiesa presenti un'elevata vulnerabilità nei confronti della pericolosità attesa a stato limite di danno e di salvaguardia della vita che risulta confermata dall'elevato danneggiamento osservato a seguito del sisma. Di seguito si riportano alcune possibili proposte di intervento, al fine di mostrare come la riduzione significativa della vulnerabilità ad essi associata avrebbe sensibilmente limitato il danneggiamento occorso. Gli interventi proposti non vogliono essere esaustivi di un progetto di miglioramento sismico del manufatto, ma unicamente esemplificativi di come la sicurezza di un manufatto architettonico sia spesso ottenibile attraverso la realizzazione di interventi semplici, economici e compatibili con la tutela del bene stesso. In particolare, si riporta di seguito la valutazione della riduzione del rischio sismico in relazione all'inserimento di due catene longitudinali (acciaio S355,  $\phi 26$ , pre-tiro pari a 60kN) poste in sommità della facciata a contrasto del cinematismo di ribaltamento (Figura 13) e all'inserimento di una catena trasversale in corrispondenza dell'arco trionfale (acciaio S355,  $\phi 26$ , pre-tiro 20kN).

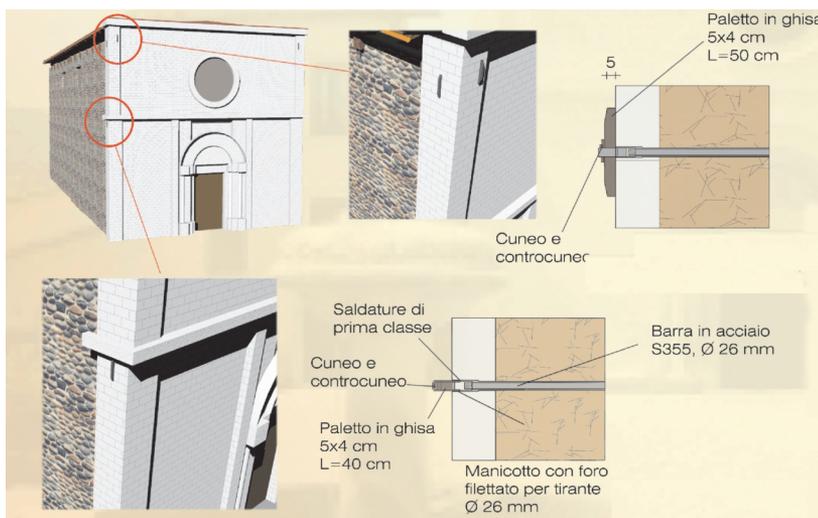


Figura 14.  
Schematizzazione  
dell'Intervento in  
facciata

Nella tabella seguente si riportano le verifiche in relazione alla realizzazione degli interventi proposti secondo i metodi dell'analisi cinematica lineare.

Tabella 8.  
Analisi cinematica lineare dei meccanismi della facciata e dell'arco trionfale nel caso di presenza di catene.

	Analisi cinematica lineare	
	Accelerazione spettrale [m/sec <sup>2</sup> ]	Domanda [m/sec <sup>2</sup> ]
Meccanismo di ribaltamento della facciata	1.46	1.50
Meccanismo a quattro cerniere dell'arco trionfale	1.70	1.50

Al fine di verificare l'efficacia degli interventi ipotizzati si riporta di seguito il calcolo della vita nominale corrispondente alla situazione ottenibile a seguito della realizzazione dell'intervento:

Tabella 9.  
Vita nominale in relazione ai meccanismi del ribaltamento della facciata e dell'arco trionfale.

	Vita nominale [anni]	
	Dopo l'intervento	
Meccanismo di ribaltamento della facciata	49	
Meccanismo a quattro cerniere dell'arco trionfale	88	

Le verifiche riportate, a seguito, della proposta di intervento evidenziano come la sicurezza strutturale possa essere considerata analoga a quella richiesta per le costruzioni di nuova realizzazione ( $V_N = 50$  anni). Nel caso del ribaltamento della facciata l'intervento proposto porta ad un valore leggermente inferiore; tuttavia, tenendo

conto che il valore di Vita nominale del meccanismo di danno prima dell'intervento era pari a 14 anni, si può concludere come il miglioramento conseguito sia tale da poter considerare efficace la soluzione tecnica proposta.

## **7 Conclusioni**

Dalle analisi effettuate è emerso come la Chiesa di SS. Marciano e Nicandro presenti una vulnerabilità elevata in relazione alla pericolosità attesa (tenendo conto della vita di riferimento normalmente assunta per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita delle strutture ordinarie) e tale considerazione risulta avvalorata dal danneggiamento osservato a seguito del sisma del 6 aprile 2009. Al fine di valutare la possibilità di ridurre la vulnerabilità del manufatto si è riportata l'analisi del miglioramento apportato in relazione alla realizzazione di un intervento di miglioramento sismico tradizionale. Tale esemplificazione consente di evidenziare come interventi concepiti in funzione della tutela del manufatto architettonico permettano il conseguimento di un livello di sicurezza adeguato, mettendo in luce l'assenza di contrapposizione tra sicurezza e conservazione.

## ALLEGATO 1: MODELLO PER LA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA SECONDO IL LIVELLO DI METODO LV1

### CHIESA DI SS. MARCIANO E NICANDRO L'AQUILA

Nel presente Allegato si riporta il rilievo degli indicatori di vulnerabilità e dei presidi antisismici riportati nell'Allegato C delle Linee Guida relativi alla chiesa di ss. Marciano e Nicandro a L'Aquila (AQ). In particolare si riportano unicamente i dati relativi ai meccanismi potenzialmente attivabili all'interno della chiesa in esame e la valutazione riguarda la situazione del manufatto prima del sisma.

<b>1 - Ribaltamento della facciata</b>		
<i>Presidi antisismici</i>		
<input type="checkbox"/>	Presenza di catene longitudinali	<i>Efficacia</i>
<input type="checkbox"/>	Presenza di efficaci elementi di contrasto (contrafforti, corpi addossati, altri edifici)	-
<input checked="" type="checkbox"/>	Ammorsamento di buona qualità tra la facciata ed i muri della navata	2
<i>Indicatori di vulnerabilità</i>		<i>Gravità</i>
<input type="checkbox"/>	Presenza di elementi spingenti (puntoni di copertura, volte, archi) - cupola	-
<input checked="" type="checkbox"/>	Presenza di grandi aperture nelle pareti laterali in vicinanza del cantonale	1
<b>2 - Meccanismi nella sommità della facciata</b>		
<i>Presidi antisismici</i>		<i>Efficacia</i>
<input type="checkbox"/>	Presenza di collegamenti puntuali con la copertura	-
<input checked="" type="checkbox"/>	Presenza di controventi di falda	2
<input type="checkbox"/>	Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)	-
<i>Indicatori di vulnerabilità</i>		<i>Gravità</i>
<input checked="" type="checkbox"/>	Presenza di grandi aperture (rosone)	2
<input checked="" type="checkbox"/>	Presenza di una sommità a vela di grande dimensione e peso	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Cordoli rigidi, trave di colmo in c.a., copertura pesante in c.a.	3
<b>3 - Meccanismi nel piano della facciata</b>		
<i>Presidi antisismici</i>		<i>Efficacia</i>
<input type="checkbox"/>	Presenza di catene in controfacciata	-
<input type="checkbox"/>	Contrasto laterale fornito da corpi addossati o facciata inserita in aggregato	-
<i>Indicatori di vulnerabilità</i>		<i>Gravità</i>
<input checked="" type="checkbox"/>	Presenza di aperture di grandi dimensioni o in numero elevato (anche se tamponate)	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Elevata snellezza (rapporto altezza/larghezza)	1
<b>5 - Risposta trasversale dell'aula</b>		
<i>Presidi antisismici</i>		<i>Efficacia</i>
<input type="checkbox"/>	Presenza di paraste o contrafforti esterni	-
<input checked="" type="checkbox"/>	Presenza di corpi annessi adiacenti	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Presenza di catene trasversali	1
<i>Indicatori di vulnerabilità</i>		<i>Gravità</i>
<input checked="" type="checkbox"/>	Presenza di pareti con elevata snellezza	1
<input type="checkbox"/>	Presenza di volte e archi	-
<b>6 - Meccanismi di taglio nelle pareti laterali (risposta longitudinale)</b>		
<i>Presidi antisismici</i>		<i>Efficacia</i>
<input checked="" type="checkbox"/>	Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità	1
<input type="checkbox"/>	Presenza di buoni architravi nelle aperture	-
<input type="checkbox"/>	Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)	-
<i>Indicatori di vulnerabilità</i>		<i>Gravità</i>
<input checked="" type="checkbox"/>	Presenza di grandi aperture o di ampie zone con muratura di limitato spessore	2
<input checked="" type="checkbox"/>	Cordoli in c.a. molto rigidi, copertura pesante in c.a.	3

<b>13 - Archi trionfali</b>		
<i>Presidi antisismici:</i>		<i>Efficacia</i>
<input type="checkbox"/>	Pareti di contrasto efficaci (basso rapporto luce/larghezza aula)	-
<input type="checkbox"/>	Presenza di una catena in posizione efficace	-
<input checked="" type="checkbox"/>	Conci di buona fattura e/o adeguato spessore	2
<i>Indicatori di vulnerabilità:</i>		<i>Gravità</i>
<input checked="" type="checkbox"/>	Presenza di copertura pesante in c.a.	3
<input type="checkbox"/>	Presenza di cupola o tiburio	-
<b>16 – Ribaltamento dell'abside</b>		
<i>Presidi antisismici:</i>		<i>Efficacia</i>
<input type="checkbox"/>	Presenza di cerchiatura (semicircolare e poligonale) o catene (rettangolare)	-
<input type="checkbox"/>	Presenza di efficaci elementi di contrasto (contrafforti, corpi addossati)	-
<input checked="" type="checkbox"/>	Presenza di copertura controventata, non spingente	1
<i>Indicatori di vulnerabilità:</i>		<i>Gravità</i>
<input type="checkbox"/>	Presenza di forte indebolimento per la presenza di aperture (anche tamponate) nelle pareti	-
<input type="checkbox"/>	Presenza di volte spingenti	-
<input checked="" type="checkbox"/>	Cordoli rigidi, copertura pesante, puntoni di falda in c. a.	3
<input checked="" type="checkbox"/>	Ammorsamento scadente	3
<b>17 - Meccanismi di taglio nel presbiterio o nell'abside</b>		
<i>Presidi antisismici:</i>		<i>Efficacia</i>
<input type="checkbox"/>	Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità	-
<input type="checkbox"/>	Presenza di buoni architravi nelle aperture	-
<input type="checkbox"/>	Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)	-
<i>Indicatori di vulnerabilità:</i>		<i>Gravità</i>
<input checked="" type="checkbox"/>	Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante	3
<input checked="" type="checkbox"/>	Presenza di grandi aperture o di ampie zone con muratura di limitato spessore	2
<b>19 - Meccanismi negli elementi di copertura - Pareti laterali dell'aula</b>		
<i>Presidi antisismici:</i>		<i>Efficacia</i>
<input type="checkbox"/>	Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)	-
<input type="checkbox"/>	Presenza di collegamenti delle travi alla muratura	-
<input type="checkbox"/>	Presenza di controventi di falda (tavolato incrociato o tiranti metallici)	-
<input checked="" type="checkbox"/>	Presenza di buone connessioni tra gli elementi di orditura della copertura	2
<i>Indicatori di vulnerabilità:</i>		<i>Gravità</i>
<input type="checkbox"/>	Presenza di copertura staticamente spingente	-
<input checked="" type="checkbox"/>	Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante	3
<b>25 – Interazioni in prossimità di irregolarità piano-altimetriche</b>		
<i>Presidi antisismici:</i>		<i>Efficacia</i>
<input type="checkbox"/>	Presenza di un'adeguata connessione tra le murature di fasi diverse	-
<input type="checkbox"/>	Presenza di catene di collegamento	-
<i>Indicatori di vulnerabilità:</i>		<i>Gravità</i>
<input checked="" type="checkbox"/>	Presenza di un'elevata differenza di rigidità tra i due corpi	3
<input checked="" type="checkbox"/>	Possibilità di azioni concentrate trasmesse dall'elemento di collegamento	3
<b>26 – Aggetti (vele, guglie, pinnacoli, statue)</b>		
<i>Presidi antisismici:</i>		<i>Efficacia</i>
<input type="checkbox"/>	Presenza di perni di collegamento con la muratura o elementi di ritegno	-
<input type="checkbox"/>	Elementi di limitata importanza e dimensione	-
<input checked="" type="checkbox"/>	Muratura monolitica (a conci squadrati o comunque di buona qualità)	2
<i>Indicatori di vulnerabilità:</i>		<i>Gravità</i>
<input checked="" type="checkbox"/>	Elementi di elevata snellezza	2
<input type="checkbox"/>	Appoggio in falso sulle murature sottostanti in falso	-
<input type="checkbox"/>	Posizione asimmetrica rispetto all'elemento sottostante (specie se l'aggetto ha notevole massa)	-