

3.3.4 – **Vulnerabilità e meccanismi di danno nelle chiese a navata unica**

S. Podestà, A. Lemme

La tipologia "a navata unica" è risultata prevalente tra tutte le chiese rilevate, in particolare sono state scelte tre chiese che più di tutte sono rappresentative, dal punto di vista tipologico, dell'intero campione studiato. Esse sono Santa Maria del Parco, chiesa isolata presente nel centro abitato di Boiano nell'area del Matese, S. Pietro Celestino presente nel centro storico di Isernia e quella di San Francesco nel centro storico di Agnone. La tipologia a navata unica è generalmente caratterizzata dalla semplicità delle forme e delle decorazioni; la facciata è a capanna, la copertura, lignea, è talvolta controsoffittata, in quest'ultimo caso piana o voltata. Elementi sempre presenti sono: le cappelle laterali, l'abside e la torre campanaria. Le prime sono in genere poco profonde e contengono gli altari minori con le immagini sacre, l'abside, invece, si presenta nella maggior parte dei casi senza transetto ed ha forme geometriche diverse.

Per le tre chiese è stata effettuata un'analisi di dettaglio, che parte dal rilievo del danno e della vulnerabilità fino all'individuazione degli interventi di miglioramento sismico. In particolare sono state effettuate le seguenti elaborazioni:

- valutazione della vulnerabilità e del conseguente danno sismico atteso in termini probabilistici con la metodologia illustrata in 3.3.3;
- analisi limite dell'equilibrio per la valutazione dei moltiplicatori di collasso per il macroelemento facciata;
- individuazione di eventuali interventi di miglioramento sismico.

L'osservazione sistematica dei danni causati alle chiese da recenti terremoti ha posto in evidenza come la risposta sismica di tale tipologia di costruzioni in muratura sia riconducibile a meccanismi di collasso connessi alla perdita di equilibrio ed alla conseguente trasformazione in un cinematismo di una o più porzioni del manufatto che si stacca dal resto della fabbrica per fessurazione o in corrispondenza di soluzioni di continuità già presenti (mancanza di ammorsamento, contatto tra murature realizzate in fasi differenti). Tuttavia l'individuazione dei possibili cinematismi e del corrispondente livello dell'azione sismica che li attiva appare un problema di non facile soluzione: le analisi strutturali di dettaglio effettuate tramite codici ad elementi finiti comportano, infatti, oneri computazionali che le rendono difficilmente applicabili in un'analisi a scala territoriale (1).

Tale considerazione evidenzia l'importanza di utilizzare metodi semplificati, il cui risultato è più stabile quantitativamente e possiede una più chiara interpretazione qualitativa da parte del progettista. La normativa italiana prevede di ricondurre l'azione sismica a forze statiche equivalenti dirette orizzontalmente, il cui valore è proporzionale al peso della costruzione attraverso un coefficiente sismico che dipende dall'accelerazione massima al suolo e dall'amplificazione dinamica, attraverso lo spettro di risposta. Nel caso degli edifici, la distribuzione di queste forze varia con l'altezza, crescendo dal basso verso l'alto in virtù della prevalente risposta sul primo modo di vibrare. Nel caso di un generico manufatto in muratura, spesso più rigido rispetto ai moderni edifici in cemento armato, l'amplificazione dinamica è contenuta e si può ragionevolmente assumere che il sisma eserciti, su ciascun elemento, forze d'inerzia orizzontali date dal prodotto del suo peso per l'accelerazione massima al suolo. Preso in considerazione un meccanismo di collasso, identificato sulla base di quanto illustrato nei precedenti paragrafi, è quindi possibile studiare la risposta sismica attraverso un approccio statico, identificando il moltiplicatore orizzontale dei carichi I , che attiva la condizione limite di perdita dell'equilibrio. La definizione di meccanismo di collasso presuppone la trasformazione dell'elemento murario in un cinematismo e quindi tale moltiplicatore si ottiene applicando il

teorema dei lavori virtuali considerando le forze agenti (pesi verticali, azione sismica orizzontale pari ai pesi per il moltiplicatore λ incognito, altre forze interne quali quelle nelle catene) e lo stato di spostamenti virtuali associato all'atto di moto. La validità del metodo è legata all'aver scelto il meccanismo di collasso nei riguardi del quale la fabbrica è effettivamente più vulnerabile; i teoremi dell'analisi limite ci dicono che il corretto meccanismo di collasso è quello per il quale il moltiplicatore è minimo. In linea di principio i possibili meccanismi di collasso sono infiniti, in quanto ciascuna struttura può essere arbitrariamente trasformata in un cinematismo inserendo piani di frattura e cerniere; in realtà la conoscenza delle tecniche costruttive e l'osservazione dei danni sul manufatto in esame o su altri simili ci consente, in genere, di restringere l'analisi a pochi casi significativi. In realtà le caratteristiche tecnologiche delle murature (tessitura dei paramenti, dimensioni degli elementi lapidei, tipologia dei cantonali) e la distribuzione delle aperture determinano inclinazioni e percorsi preferenziali delle lesioni. L'analisi deve quindi essere eseguita su un numero limitato di meccanismi, effettivamente possibili in considerazione della tecnologia costruttiva e meglio se riconosciuti, a seguito di un sisma, sul manufatto in oggetto o su altre chiese simili.

I principi teorici che consentono di eseguire una verifica sismica attraverso l'analisi limite di meccanismi di collasso (2), sono concettualmente semplici ma risultano di complessa e delicata applicazione, a livello professionale, per diverse ragioni:

- è necessaria un'adeguata modellazione della geometria degli elementi architettonici, che sono in genere complessi per la presenza di aperture, variazioni dello spessore delle pareti, paraste e cornici; la valutazione di volumi e baricentri e le conseguenti verifiche di equilibrio, da eseguirsi con gli strumenti della statica grafica o in forma analitica, non sono operativamente semplici;
- un'analisi affidabile presuppone di tenere conto, oltre che della geometria, degli aspetti tecnologici, ovvero è necessario considerare anche la resistenza del materiale se si vuole individuare correttamente il moltiplicatore minimo tra diversi meccanismi; ad esempio alcuni meccanismi di rottura, quali l'attrito per i cinematismi di scorrimento e l'ingranamento per le rotazioni con asse verticale nel piano della parete, non possono essere trascurati;
- è indispensabile non perdere di vista il comportamento globale della fabbrica, che l'approccio per macroelementi non coglie; infatti la risultante complessiva delle azioni sismiche, data dalla massa della struttura per il coefficiente sismico, deve, in qualche modo, essere riportata a terra, eventualmente con ridistribuzioni tra i macroelementi, che nella chiesa sono possibili attraverso la copertura.

Per questo è stato utilizzato, per l'analisi di vulnerabilità strutturale delle tre chiese campione, un codice di calcolo, che consente di eseguire le verifiche sui diversi macroelementi di una chiesa in modo organico ed automatico, considerando i possibili cinematismi di collasso. Il programma prende in considerazione una chiesa dalla tipologia piuttosto semplice: navata unica, con arco trionfale presbiterio ed abside che bene si adatta alla struttura delle chiese in esame; tuttavia per ciascun elemento che la compone il programma propone modelli per svariate tipologie (4) (5). L'analisi che si propone parte, come è ovvio attendersi, dalla condizione di stato di fatto rilevato durante i sopralluoghi; tuttavia è importante sottolineare come molte chiese abbiano subito recentemente interventi di consolidamento (rifacimenti delle coperture, inserimenti di cappe armate sulle volte) che hanno presumibilmente modificato il comportamento originario della struttura.

Tale aspetto esula in parte dalla finalità che tale studio si prefigge, l'obiettivo è, infatti, cercare di mitigare il danno in occasione del sisma, e certi interventi, rappresentano, nella maggior parte dei casi, una parte "ormai irreversibilmente integrante" della struttura.

LA CHIESA DI S.MARIA DEL PARCO A BOIANO

La chiesa, le cui origini sono ignote, è ubicata nel centro urbano di Boiano, in una zona pianeggiante. L'edificio, isolato, è a navata unica con cappelle laterali e la torre campanaria quadrata, posta in pianta al centro del lato sinistro, raggiunge i 26 mt. di altezza. L'interno della chiesa è caratterizzato dall'abside poligonale, dall'arco trionfale, e dalla scalinata interna che ne consente l'accesso. La struttura della copertura è realizzata con capriate lignee e tavellonato, anche se le volte a botte in pietra, visibili nell'aula e nella zona absidale, hanno anch'esse funzione strutturale. La chiesa ha profonde relazioni con altri edifici religiosi di Boiano: il portale è stato prelevato dalla chiesa di Santo Spirito, la campana del 1448 dalla chiesa di San Leonardo e molti beni conservati in Santa Maria del Parco appartengono alla chiesa di San Cataldo a partire dal 1620 circa. Attualmente il suo stato di manutenzione è buono ed è utilizzata quotidianamente per le funzioni religiose.



Vista laterale con torre campanarie e facciata



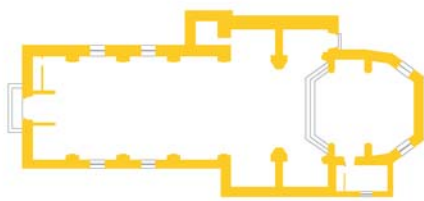
Portale ingresso



Arco trionfale

Principali dati tipologici e dimensionali

- Navata unica a 6 campate con arconi e arco trionfale, aula di dimensioni in pianta di mt. 10.0 x 28.0 e H massima interna 11.75 mt.
- Volte dell'aula: a botte lunettate in pietra con quota d'imposta a 6.83 mt.
- Facciata a capanna con un'apertura nella sommità
- Abside a forma ottagonale con volta in pietra e apertura di grande dimensione nella parte alta (larghezza 9.30 mt x profondità 8.15 mt. - altezza 10.20 mt).
- Cappelle laterali nella quinta e sesta campata di dimensioni 4.50 x 2.60 mt. e altezza di 3.20 mt.
- Torre campanaria a pianta quadrata di dimensioni 4.50 x 4.50 mt. con il lato sinistro inserito in pianta.



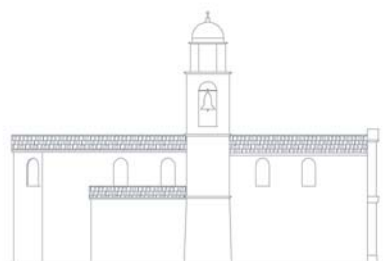
Pianta



Sezione trasversale



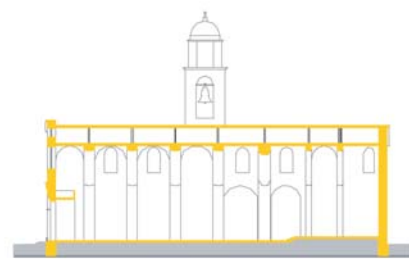
Prospetto posteriore



Prospetto lato torre campanaria



Prospetto principale



Sezione longitudinale

Indicatori di vulnerabilità

Assenza in facciata di catene longitudinali e di un collegamento tra il timpano e la copertura (necessari a contrastare i meccanismi di ribaltamento della facciata), assenza di catene trasversali e di contrafforti in corrispondenza degli arconi, assenza di catene e cerchiature nella zona absidale; in facciata la cortina in mattoni non è ammorsata alla muratura in pietra, in copertura sono presenti capriate lignee in pessime condizioni e la volta a botte è spingente sulle pareti laterali; nella parte bassa della torre campanaria è visibile un allargamento dei giunti della muratura squadrata e sono assenti catene.

Catene sono invece presenti nella parte centrale e nelle celle campanarie; sono presenti due celle campanarie con copertura pesante; sono possibili effetti al suolo dovuti alla variazione del regime idraulico del terreno in quanto il livello di falda si trova a pochi cm al di sotto del piano di campagna e in estate subisce notevoli escursioni.



Muratura

Gli elementi costitutivi sono in pietra calcarea squadrata e sbozzata di dimensioni variabili. La malta è di calce aerea con funzione di allettamento in buono stato di conservazione, lavorazione e consistenza. L'intonaco è presente nelle pareti laterali. La sezione trasversale è costituita da due paramenti ammorsati di dimensione complessiva compresa tra 110 cm (pareti laterali, facciata e abside) e 150 cm (campanile).

La facciata presenta un rivestimento esterno realizzato con mattoni pieni ad una testa con concatenamento a cortina non ammorsati alla parete in pietra.

Nelle pareti laterali, nell'abside e nella torre campanaria è presente, nella parte bassa, una muratura squadrata di medie dimensioni a corsi orizzontali e regolari, nella parte alta verso la copertura le pietre sono di dimensioni minori con corsi irregolari. In questa zona la muratura è integrata con mattoni pieni. Le volte sono in mattoni ricostruite a seguito di eventi sismici.



Condizioni di danno attuale

Sono presenti lesioni verticali sul lato sinistro nella parte alta della facciata e nella parete al di sopra l'arco trionfale dovute alla rotazione delle pareti laterali a causa della spinta esercitata dalla volta.

Le lesioni sono visibili anche all'esterno nella parte alta della facciata. Sconnessioni e lesioni sono presenti in corrispondenza degli alloggi delle capriate nelle pareti laterali, in copertura è presente uno stato generale di degrado e si evidenzia una carenza nei collegamenti tra le pareti.

Interventi di miglioramento sismico e riduzione della vulnerabilità:

- inserimento di catene longitudinali in facciata e nella zona absidale;
- inserimento di catene trasversali nel piano della facciata;
- inserimento di catene trasversali in corrispondenza degli arconi;
- realizzazione di controventi di falda;
- rifacimento della copertura in legno con struttura in capriate, travicelli e tavolato previa realizzazione di cordolo piano o metallico di coronamento sul perimetro della chiesa;
- realizzazione di una trave reticolare in acciaio in aderenza al timpano collegata alle strutture di copertura;
- inserimento di catene nella parte bassa della torre;
- consolidamento delle murature delle pareti laterali e di facciata (inserimento di diatoni);
- consolidamento delle volte dell'aula mediante fibre rinforzate;
- ammorsamento del paramento di facciata in mattoni alla muratura in pietra;

Analisi dei moltiplicatori di collasso per i meccanismi della facciata nella situazione attuale e nella ipotesi di miglioramento sismico.

Per quanto riguarda il macroelemento facciata si è valutata l'efficacia degli interventi previsti con il codice di calcolo precedentemente descritto. I risultati del miglioramento ottenuto sono riportati nella tabella seguente, in cui sono messi a confronto i risultati ottenuti prima e dopo gli interventi proposti.

Ribaltamento del timpano	Moltiplicatore di collasso		Descrizione dell'intervento
	Stato di fatto	Intervento	
Formazione di una cerniera alla base del timpano	0.26g	∞	Rifacimento della copertura in legno con struttura in capriate, travicelli e tavolato previa realizzazione di cordolo piano o metallico di coronamento sul perimetro della chiesa e di tavolato irrigidente. Realizzazione di una trave reticolare in acciaio in aderenza al timpano collegata alle strutture di copertura.
Formazione di due cerniere inclinate in corrispondenza dell'apertura centrale	0.18g	∞	
Formazione di una cerniera orizzontale in corrispondenza del colmo della copertura	4.80g	4.80g	
Ribaltamento della facciata			
Ribaltamento globale	0.09g	0.42g	Inserimento due catene longitudinali a 11.0 m da terra.
Ribaltamento parziale	0.15g	0.46g	
Formazione di una cerniera intermedia	Assente	0.50g	Rifacimento della copertura.
Ribaltamento della parte superiore alla catena	Assente	0.27g	
Meccanismi di rottura a taglio			
Meccanismo di rottura dei maschi murari alla base	0.77g	0.74g	Inserimenti di catene trasversali nel piano della facciata. Consolidamento della facciata.
Meccanismo con lesione centrale	0.30g	0.29g	
Meccanismo con lesione trasversale su tutta la facciata	0.36g	0.43g	

Tab. 3.3.4.1 – Moltiplicatori di collasso della facciata

I risultati ottenuti forniscono alcuni importanti spunti di riflessione. Per quanto riguarda i meccanismi che interessano la parte sommitale della facciata, il rifacimento della copertura prevista con l'inserimento del cordolo (reticolare) metallico in sommità della muratura del timpano permette di ottenere una sostanziale riduzione del moltiplicatore di collasso. Nell'ottica di corpo rigido tali cinematismi non sono più possibili proprio in relazione agli interventi previsti che impediscono a livello della copertura la formazione delle lesioni da ribaltamento.

Per quanto riguarda i meccanismi complessivi fuori dal piano della facciata, i valori che si ottengono manifestano per l'assenza di collegamenti longitudinali i valori più preoccupanti. L'intervento previsto è, infatti, mirato all'inserimento di due catene longitudinali che innalzano il livello di sicurezza, attivando due ulteriori meccanismi legati alla presenza del vincolo intermedio rappresentato dalla catena inserita.

Il rifacimento della copertura, in cui sono stati previsti dei controventi di falda, determina altresì una riduzione della componente ribaltante sulla facciata, innalzando ulteriormente il valore del moltiplicatore di collasso. L'intervento in copertura comporta, tuttavia, un incremento del peso e soprattutto della rigidezza delle falde che determina un abbassamento dei moltiplicatori nei riguardi di un'azione nel piano della facciata. In tal caso l'intervento proposto non sarebbe migliorativo. È importante sottolineare come la riduzione sia molto contenuta e soprattutto come il valore ottenuto risulti in termini assoluti pur sempre maggiore di quelli relativi ai meccanismi di I modo. Tale valutazione, tenendo conto dell'aleatorietà dell'azione sismica, giustifica l'intervento, mettendo in luce come sia sempre necessario una valutazione globale delle opere strutturali che si intendono realizzare.

Valutazione del danno e della vulnerabilità in termini probabilistici

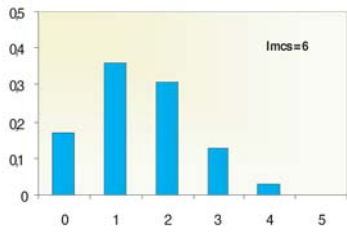
Calcolata la vulnerabilità nella situazione senza intervento con l'espressione riportata in 3.3.1.2, è possibile ottenere intersecando con le curve di fragilità [3.3.3.2] il valore del danno medio atteso per I_{mcs} crescente, che è rappresentabile attraverso DPM su cinque livelli di danno in funzione della distribuzione probabilistica [3.3.3.1]. Il procedimento

Situazione senza intervento	I_d	I_v					0,46	
		0	1	2	3	4	5	
Indice di danno medio per $I_{mcs} = 6$	0,30	0,15	0,36	0,31	0,13	0,03	0,00	
Indice di danno medio per $I_{mcs} = 7$	0,45	0,05	0,21	0,34	0,27	0,11	0,02	
Indice di danno medio per $I_{mcs} = 8$	0,61	0,01	0,07	0,22	0,35	0,27	0,08	
Indice di danno medio per $I_{mcs} = 9$	0,76	0,00	0,01	0,08	0,25	0,40	0,26	

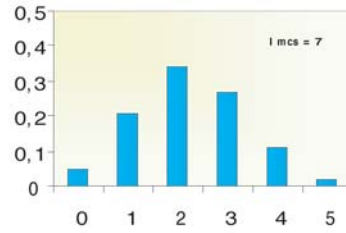
Situazione con intervento	I_d	I_v					0,14	
		0	1	2	3	4	5	
Indice di danno medio per $I_{mcs} = 6$	0,17	0,40	0,40	0,16	0,03	0	0	
Indice di danno medio per $I_{mcs} = 7$	0,28	0,20	0,38	0,29	0,11	0,02	0	
Indice di danno medio per $I_{mcs} = 8$	0,41	0,07	0,25	0,35	0,24	0,08	0,01	
Indice di danno medio per $I_{mcs} = 9$	0,55	0,02	0,12	0,28	0,34	0,20	0,050	

Tab. 3.3.4.2 - Indice di vulnerabilità – indice e probabilità di danno atteso

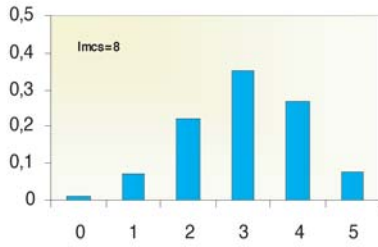
DPM - Situazione senza intervento – $I_v = 0,46$



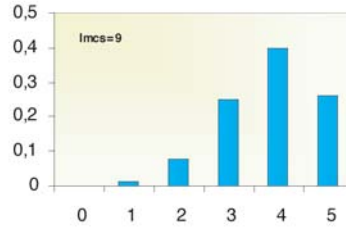
I mcs = 6 — indice di danno medio 0,30



I mcs = 7 — indice di danno medio 0,45

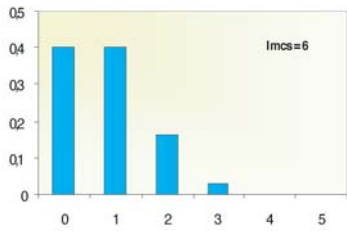


I mcs = 8 — indice di danno medio 0,61

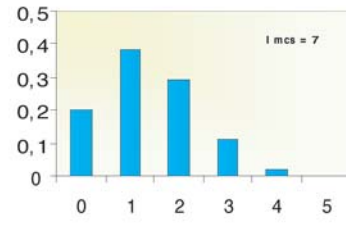


I mcs = 9 — indice di danno medio 0,76

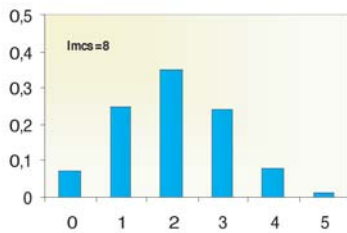
DPM - Situazione con intervento - $I_v = 0,14$



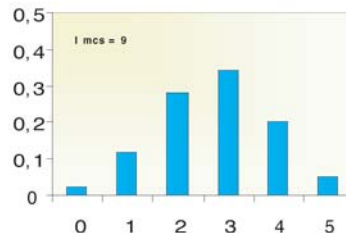
I mcs = 6 — indice di danno medio 0,17



I mcs = 7 — indice di danno medio 0,28



I mcs = 8 — indice di danno medio 0,41



I mcs = 9 — indice di danno medio 0,55

Fig. 3.3.4.1 - Matrici di probabilità di danno nella situazione senza e con intervento

LA CHIESA DI S. FRANCESCO AD AGNONE

Il complesso monastico di S. Francesco è il più rilevante per ampiezza e per livello di conservazione di Agnone. Risale al 1343 e ha subito profonde modifiche nel 1732.

L'impianto della chiesa è a croce latina con cappelle laterali e transetto sormontato da cupola. L'interno della chiesa, ristrutturata nel XVII sec., presenta una volta a botte ribassata affrescata da Paolo Gamba nel 1771. Il prospetto frontale ospita un portale ad ogiva elegantemente intarsiato con colonnine e pilastrini angolari; su di esso è presente un ampio rosone. La tessitura muraria della fabbrica originaria è a blocchi in pietra squadrata. La torre campanaria, alta 23 mt, ha forma rettangolare (7.5 x 8.5 mt) ed è posizionata sul lato sinistro con una parte in comune con l'abside. La copertura, recentemente ristrutturata, è in struttura lignea non spingente con cordolo perimetrale.



Facciata



Cupola



Volta dell'aula

Principali dati tipologici e dimensionali

- Navata unica con aula di dimensioni in pianta di 20.00 x 12.80 mt. e altezza massima interna di 10.80 mt.
- Arconi interni in corrispondenza delle campate, arco trionfale e arconi laterali nel presbitero e verso l'abside.
- Volte dell'aula a botte ribassata e lunettata con quota di imposta a 9.50 mt.
- Facciata a capanna con grande apertura circolare nella parte alta.
- Abside a forma rettangolare avente larghezza di 9.30 mt, profondità di 8.15 mt e altezza di 10.20 mt, con volta in pietra e presbitero (13.0 x 9.0 mt.) coperto con cupola circolare (diametro 8.0 mt.)
- Cappelle laterali nella quattro campate aventi larghezza di 3.10 mt, profondità di 2.80 mt e altezza di 6.0 mt.
- Torre campanaria a pianta rettangolare (8.50 x 7.50 mt.) avente altezza di 23.00 mt. con doppia cella campanaria.



Pianta



Facciata



Sezione trasversale

Indicatori di vulnerabilità

- assenza in facciata di catene longitudinali e di controventi di falda;
- indebolimento della facciata dovuto alla presenza del rosone;
- volta a botte ribassata presenta e lunette di dimensione considerevoli;
- assenza di catene, cerchiature e controventi di falda nella zona absidale e nella cupola;
- possibili interazioni con la struttura del convento dovute alla differenza di rigidità tra i due corpi.



Volta dell'aula



Facciata - zona laterale



Sommità absidale

Condizioni di danno attuale

Lesioni capillari in chiave agli arconi dell'aula, nella cupola e sul timpano della facciata.

Muratura

La facciata è composta di una parte centrale, intorno al portale fino alla sommità del rosone, costituita da blocchi regolari di pietra squadrata di medie dimensioni circondata lateralmente e in sommità da muratura squadrata con spigoli arrotondati a corsi regolari ed orizzontali; la stessa muratura continua nelle pareti laterali e nelle altre parti della chiesa compresa la torre campanaria. La malta idraulica con funzione di riempimento e stilatura presenta un buono stato di conservazione e consistenza; l'intonaco è presente sulle pareti laterali; la sezione trasversale della muratura dell'aula è di 80 cm e quella dell'abside varia da 80 cm (posteriore) fino a 160 cm (lato campanile) ed è costituita da due paramenti ammorsati. Le volte sono in pietra; si segnala l'utilizzo della muratura in mattoni pieni per il rifacimento di alcuni architravi nel prospetto laterale, sul coronamento esterno della cupola e della copertura.



Facciata - zona centrale



Facciata - zona laterale



Parete laterale

Interventi di miglioramento sismico e riduzione della vulnerabilità:

- inserimento di catene longitudinali in facciata e nella zona absidale;
- inserimento di catene trasversali nel piano della facciata;
- inserimento di catene trasversali in corrispondenza degli arconi dell'aula.



Parete laterale



Sezione muraria



Sezione longitudinale

Analisi dei moltiplicatori di collasso per i meccanismi della facciata nella situazione al momento del rilievo e nell'ipotesi di miglioramento sismico.

I risultati dell'analisi effettuata con il codice di calcolo, basato sull'ipotesi dell'analisi limite dell'equilibrio, sono riportati nella tabella seguente, in cui a fianco dei moltiplicatori ottenuti per la condizione attuale sono riportati quelli relativi all'intervento proposto, basato nell'inserimento di catene longitudinali e trasversali nel piano della facciata.

Ribaltamento del timpano	Moltiplicatore di collasso		Intervento
	Stato di fatto	Intervento	
Formazione di una cerniera alla base del timpano	0.21g	∞	Telaio metallico in aderenza al timpano collegato alle strutture di copertura. Telaio metallico di rinforzo del rosone.
Formazione di due cerniere inclinate in corrispondenza dell'apertura centrale	0.11g	∞	
Formazione di una cerniera orizzontale in corrispondenza del colmo della copertura	1.05g	1.05g	
Ribaltamento della facciata			
Ribaltamento globale - cerniera cilindrica in corrispondenza della base della facciata	0.07g	0.42g	Inserimento due catene longitudinali a 10 m da terra (al di sopra delle aperture delle pareti laterali)
Ribaltamento parziale - cerniere cilindrica in corrispondenza di una sezione di debolezza in facciata	0.15g	0.45g	
Formazione di una cerniera intermedia	Assente	0.43g	
Ribaltamento della parte superiore alla catena	Assente	0.16g	
Meccanismi di rottura a taglio			
Meccanismo di rottura dei maschi murari alla base	1.10g	1.10g	Inserimenti di catene trasversali nel piano della facciata.
Meccanismo con lesione centrale	0.49g	0.55g	
Meccanismo con lesione trasversale su tutta la facciata	0.39g	0.70g	

Tab. 3.3.4.3 Moltiplicatori di collasso della facciata

I risultati permettono di effettuare alcune semplici considerazioni. Per quanto riguarda i meccanismi di collasso che interessano la parte sommitale della facciata, si può osservare come il collegamento dei terzi della copertura con la muratura del timpano consenta di ridurre in maniera sostanziale la vulnerabilità del macroelemento.

I due cinematismi relativi al ribaltamento rispetto ad una cerniera orizzontale o attraverso la formazione di due cerniere inclinate, sono di fatto impediti dal cordolo metallico e dal telaio metallico che collegano le travi della copertura con la muratura, impedendo altresì il possibile martellamento.

Tale aspetto risulta, seppur facilmente intuibile, un elemento molto comune di vulnerabilità, in molti casi il cordolo viene realizzato solo sulle pareti laterali senza farlo proseguire sul coronamento del timpano, favorendo, pertanto, situazioni particolarmente danneggiabili. Per quanto riguarda i meccanismi di I modo della facciata, si nota come il ribaltamento globale sia il meccanismo più vulnerabile.

L'assenza di catene longitudinali determina la mancanza di un efficace contrasto all'attivazione del cinematismo.

La presenza di un cantonale di buona fattura non può essere considerato da solo un presidio antisismico; le aperture sulle pareti laterali, in posizione ravvicinata allo spigolo, impediscono di poter computare, nel calcolo del moltiplicatore, una porzione stabilizzante rilevante.

In fase d'intervento si nota come l'inserimento di due catene longitudinali permetta di ridurre la vulnerabilità: il moltiplicatore relativo a tale meccanismo s'incrementa in maniera rilevante.

Tale valore non rappresenta il livello di sicurezza raggiunto; l'inserimento dell'incatenamento porta alla possibilità di formazione di due nuovi meccanismi, in funzione del vincolo intermedio rappresentato dalla catena metallica. In tale caso si nota come il posizionamento dei tiranti ad una quota da terra di circa 9.5 m, in corrispondenza

degli architravi delle aperture laterali, porta il valore del moltiplicatore del meccanismo più pericoloso a 0.164 g.

Il programma è in grado di cogliere in maniera veloce la posizione ideale per inserire le catene longitudinali: collocare i tiranti al di sopra del fregio, ad una quota di 6.75 mt, avrebbe determinato il cambiamento di meccanismo, senza un sostanziale incrementato della sicurezza.

Per quanto riguarda i meccanismi di II modo, i valori del moltiplicatore di collasso risultano essere già elevati nella situazione attuale, ed in ogni caso maggiori rispetto a quelli che si riescono ad ottenere per i meccanismi di I modo anche dopo l'intervento di miglioramento sismico.

Tuttavia il semplice inserimento di una catena trasversale, in adiacenza alla parete di facciata, consente di innalzare tali moltiplicatori; in tale caso la presenza dell'ampio rosone centrale ha determinato il posizionamento della catena ad una quota di 6.25 mt dal piano di campagna, in modo da non interagire con l'apertura in facciata.

Valutazione del danno e della vulnerabilità in termini probabilistici.

La riduzione della vulnerabilità a seguito degli interventi che sono stati proposti permette di cogliere il miglioramento proposto anche in termini probabilistici. Si sono, infatti, ricalcolate le matrici di probabilità del danno atteso dopo l'intervento, valutando l'entità del danno in funzione dell'input sismico previsto.

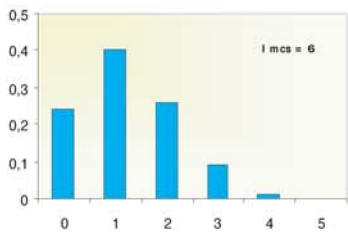
Nella tabella seguente viene riportato il confronto tra la situazione iniziale e quella finale dopo l'intervento

Situazione senza intervento	I _d	0	1	I _v		0,38	
				2	3	4	5
Indice di danno medio per I mcs =6	0,25	0,24	0,40	0,26	0,09	0,01	0,00
Indice di danno medio per I mcs =7	0,43	0,09	0,28	0,34	0,21	0,07	0,01
Indice di danno medio per I mcs =8	0,58	0,02	0,13	0,29	0,33	0,19	0,04
Indice di danno medio per I mcs =9	0,74	0,00	0,03	0,15	0,32	0,35	0,15

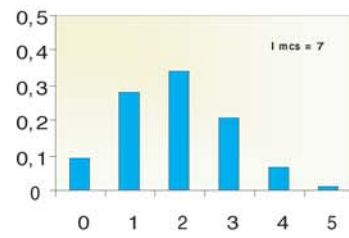
Situazione con intervento	I _d	0	1	I _v		0,23	
				2	3	4	5
Indice di danno medio per I mcs =6	0,19	0,34	0,41	0,20	0,05	0,01	0,00
Indice di danno medio per I mcs =7	0,31	0,15	0,35	0,32	0,15	0,03	0,00
Indice di danno medio per I mcs =8	0,45	0,05	0,20	0,34	0,28	0,11	0,02
Indice di danno medio per I mcs =9	0,60	0,01	0,08	0,23	0,35	0,25	0,08

Tab. 3.3.4.4 Indice di vulnerabilità - indice e probabilità di danno atteso

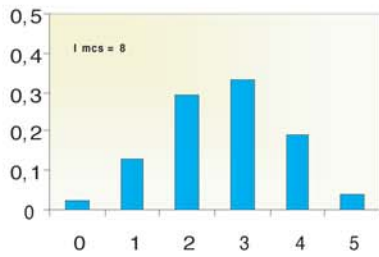
DPM - Situazione senza intervento - $I_v = 0,38$



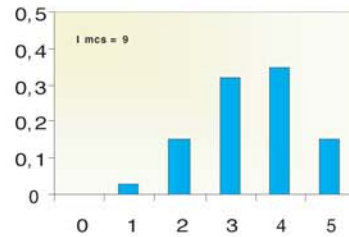
I mcs = 6 — indice di danno medio 0,25



I mcs = 7 — indice di danno medio 0,38

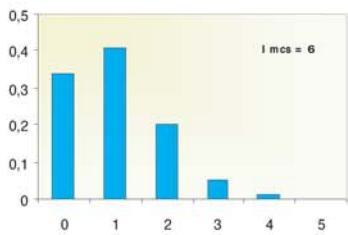


I mcs = 8 — indice di danno medio 0,53

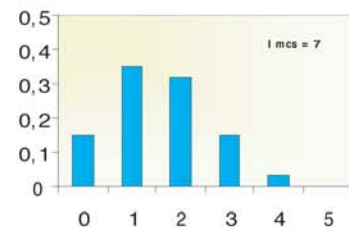


I mcs = 9 — indice di danno medio 0,69

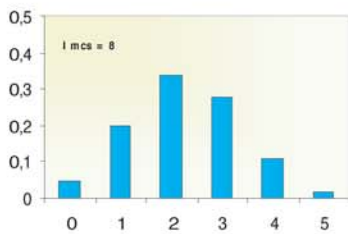
Situazione con intervento - $I_v = 0,23$



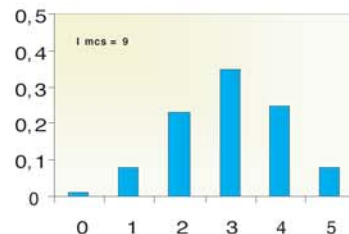
I mcs = 6 — indice di danno medio 0,19



I mcs = 7 — indice di danno medio 0,31



I mcs = 8 — indice di danno medio 0,45



I mcs = 9 — indice di danno medio 0,60

Fig. 3.3.4.2 - Matrici di probabilità di danno nella situazione senza e con intervento

La Chiesa di S. Pietro Celestino ad Isernia

La chiesa fu fondata nel 1623 nei pressi della porta Napoli, a sud della città, accanto all'omonimo monastero, poi soppresso nel 1809. Nel 1744 si presentava a navata unica, con soffitto di tavole dipinte e pavimento in mattoni e 4 cappelle distribuite sui due lati.

Attualmente la chiesa presenta un impianto a navata unica, con cappelle laterali nello spessore della muratura ed arconi trasversali; l'abside rettangolare è separato dall'aula dall'arco trionfale e sono presenti dei corpi bassi annessi sul lato sinistro destinati a sacrestia e alla canonica. Nella zona absidale è presente un piano interrato. La torre campanaria è costituita da uno sperone posto sul lato sinistro; la volta dell'aula è a botte lunettata e l'abside è coperto da una cupola ribassata. La chiesa è stata riparata a seguito del sisma del 1984 con rifacimento della copertura in c.a. e cordolo perimetrale ancorato alle murature sottostanti, consolidamento delle volte con cappa in c.a. ancorata al timpano e cordolo in breccia, cuciture incrociate negli spigoli e il consolidamento delle murature con iniezioni di malta cementizia.



Facciata



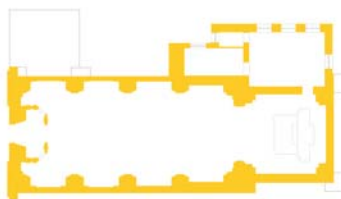
Aula



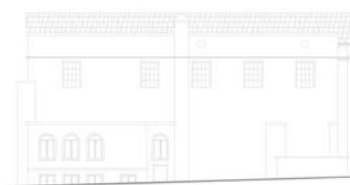
Prospetto laterale

Principali dati tipologici e dimensionali

- Navata unica a 4 campate con arconi e arco trionfale; larghezza aula 8.75 mt., lunghezza 19.00 mt., H massima interna 11.10 mt.
- Arconi interni in corrispondenza delle campate (1.40 mt.) e arco trionfale (1.0 mt.).
- Volte dell'aula a botte ribassata e lunettata con quota d'imposta a 9.50 mt.
- Facciata a capanna con apertura rettangolare nella parte alta.
- Facciata posteriore del presbiterio a capanna con cupola ribassata in pietra (5 mt diametro) - presbiterio larghezza 6.9 mt., profondità 6.80 mt., altezza 13.00 mt.
- Cappelle laterali della quattro campate, ricavate nello spessore della muratura aventi larghezza di 3.0 mt. e altezza di 5.20 mt.
- Torre campanaria costituita da un contrafforte sul lato della chiesa in corrispondenza del terzo arcone di larghezza 1.20 mt., profondità 2.20 mt. e altezza di 14.00 mt.
- Sacrestia in posizione posteriore sinistra e locale interrato al di sotto del presbiterio



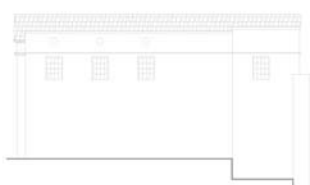
Pianta



Prospetto laterale



Facciata



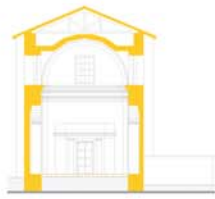
Prospetto laterale destro



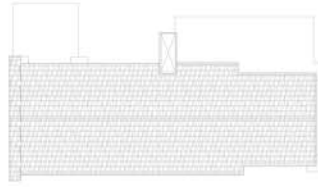
Prospetto posteriore



Sezione longitudinale



Sezione trasversale



Pianta copertura



Piano interrato

Indicatori di vulnerabilità:

- assenza di catene longitudinali;
- assenza di collegamento tra il timpano e la copertura;
- indebolimento della sommità della facciata per la presenza di una apertura;
- assenza di catene trasversali e contrafforti in corrispondenza di tutti gli archi;
- assenza di catene longitudinali nella zona absidale;
- aumento del peso originario delle volte e della copertura.



Facciata e prospetto laterale



Cupola



Aula — lato facciata

Muratura

Composta in prevalenza da pietre sbazzate o leggermente squadrate con mazzette e ricorsi negli spigoli con tessitura orizzontale con alternanza regolare. In alcuni parti della fabbrica (parte alta torre campanaria/sperone, parte bassa della parete laterale) è presente una pietra squadrata di medie dimensioni, la sezione trasversale è composta da due paramenti debolmente ammorsati aventi sezione di circa 100 cm in facciata e 50 cm nelle pareti laterali. La malta originaria è stata sostituita con quella cementizia dell'intervento di riparazione post-terremoto. Risultano intonacate la facciata, la parte bassa della parete laterale sul lato del campanile. Le volte sono in pietra e risultano consolidate con una cappa cementizia ancorata alla muratura con barre di acciaio ad aderenza migliorata. Caratteristiche : peso specifico 20.000 N/mq, resistenza tangenziale 40.000 N/mq.



Parete laterale



Facciata



Torre campanaria



Presbiterio

Interventi di miglioramento sismico e riduzione della vulnerabilità:

- inserimento di catene longitudinali in facciata e nella zona absidale;
- inserimento di catene nel piano della facciata;
- inserimento di catene trasversali in corrispondenza degli arconi;
- telaio metallico in aderenza al timpano collegato alle strutture di copertura e di rinforzo alla apertura nella parte alta della facciata.

Analisi dei moltiplicatori di collasso per i meccanismi della facciata nella situazione attuale e nella ipotesi di miglioramento sismico.

Anche per questa chiesa si riportano i risultati dell'analisi numerica effettuata con il codice di calcolo, basato sull'ipotesi dell'analisi limite dell'equilibrio. Gli interventi previsti, a seguito del rilievo della vulnerabilità, sono principalmente mirati ad un miglioramento dei collegamenti tra le pareti ortogonali.

Va sottolineato che i cantonali in corrispondenza della facciata sono stati oggetto di un intervento di consolidamento tramite cuciture armate incrociate che nell'intenzione del progettista avrebbero dovuto ricreare l'ammorsamento tra pareti laterali e facciata. L'efficacia di tale tipologia d'intervento è limitata: in particolare si evidenzia come per il modello di verifica assunto, la presenza d'aperture nelle pareti laterali rende minimo il contributo stabilizzante della porzione di muratura delle pareti laterali. E' per tale ragione che si è previsto, nella simulazione proposta, l'inserimento di due catene longitudinali.

Per quanto riguarda la parte sommitale della facciata si nota come la presenza di un doppio cordolo, a livello della volta e sulla sommità della muratura del timpano, elimini teoricamente la possibilità d'attivazione di cinematismi di collasso legati al danneggiamento del timpano. In tal caso una più realistica valutazione della vulnerabilità residua dovrebbe tenere conto delle modalità con cui è stato realizzato il cordolo in c.a. in relazione alla muratura sottostante.

	Moltiplicatore di collasso		Intervento
	Stato di fatto	Intervento	
Ribaltamento del timpano			
Formazione di una cerniera alla base del timpano	∞	∞	
Formazione di due cerniere inclinate in corrispondenza dell'apertura centrale	∞	∞	
Formazione di una cerniera orizzontale in corrispondenza del colmo della copertura	7.50g	7.50g	
Ribaltamento della facciata			
Ribaltamento globale	0.05g	0.58g	Inserimento di due catene longitudinali a 10 m da terra.
Ribaltamento parziale	0.07g	0.63g	
Formazione di una cerniera intermedia	Assente	0.33g	
Ribaltamento della parte superiore alla catena	Assente	0.36g	
Meccanismi di rottura a taglio			
Meccanismo di rottura dei maschi murari alla base	1.00g	1.05g	Inserimenti di una catena trasversali nel piano della facciata a 6 m da terra
Meccanismo con lesione centrale	∞	∞	
Meccanismo con lesione trasversale su tutta la facciata	0.29g	0.42g	

Tab. 3.3.4.5 Moltiplicatori di collasso della facciata

Gli interventi proposti limitano, anche per tale caso, la vulnerabilità del macroelemento considerato.

Per quanto riguarda il timpano, come in parte già accennato, l'intervento realizzato recentemente impedisce l'attivazione dei primi due meccanismi di danno. Per tale situazione si può notare come il moltiplicatore, legato alla formazione della cerniera orizzontale in corrispondenza del colmo della copertura, presenti un valore molto alto, che è dovuto al limitato stacco della facciata rispetto alla trave di colmo. Queste considerazioni hanno portato a non prevedere alcun intervento sulla sommità della facciata.

Per quanto riguarda i meccanismi di I modo della facciata, si nota come il ribaltamento globale sia il meccanismo più vulnerabile. La presenza di una volta a botte in cui è stato realizzato un intervento con cappa armata, aumenta il peso e conseguentemente l'azione che interagisce con la facciata (oltre il 30% della azione originaria). In ogni caso l'inserimento di due catene longitudinali permette di ridurre la vulnerabilità: il moltiplicatore relativo a tale meccanismo s'incrementa in maniera rilevante.

Il meccanismo più vulnerabile diventa quello relativo al ribaltamento che si sviluppa con la formazione di una cerniera intermedia con un valore del moltiplicatore di attivazione pari a 0.33g.

Per quanto riguarda i meccanismi di II modo, i valori del moltiplicatore di collasso risultano essere paragonabili a quelli che si sono ottenuti per un'azione fuori dal piano, una volta inserite le catene longitudinali. Pertanto si ritiene utile intervenire attraverso il posizionamento di una catena trasversale, in adiacenza alla parete di facciata, che consente di innalzare ulteriormente tali moltiplicatori senza creare scompensi per altri meccanismi di danno.

Valutazione del danno e della vulnerabilità in termini probabilistici

La riduzione della vulnerabilità, a seguito degli interventi che sono stati proposti, permette di cogliere il miglioramento proposto anche in termini probabilistici. Si sono, infatti, ricalcolate le matrici di probabilità del danno atteso dopo l'intervento, valutando l'entità del danno in funzione dell'input sismico previsto.

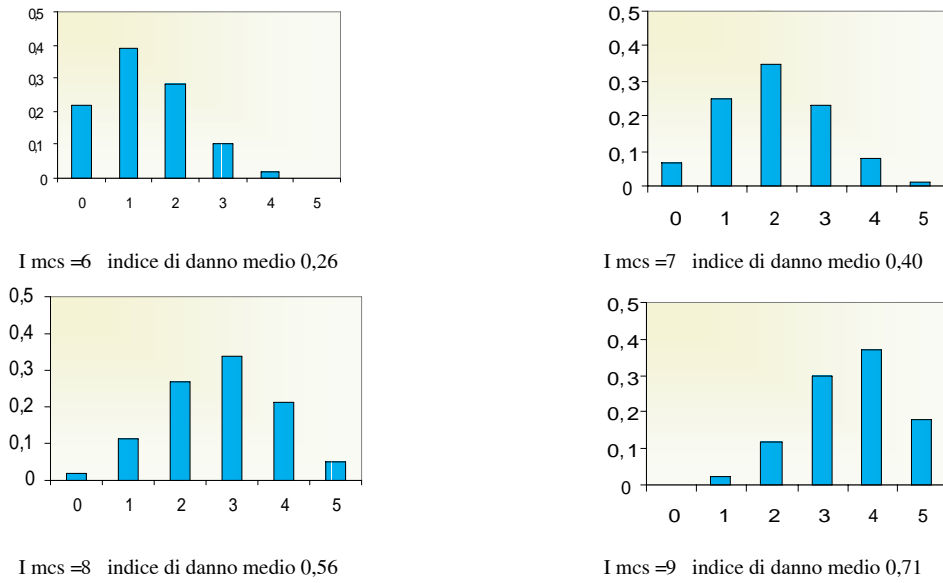
Nella tabella seguente viene riportato il confronto tra la situazione iniziale e quella finale dopo l'intervento.

Situazione senza intervento	I _d	I _v					0,42	
		0	1	2	3	4	5	
Indice di danno medio per I mcs =6	0,26	0,22	0,39	0,28	0,10	0,02	0,00	
Indice di danno medio per I mcs =7	0,40	0,07	0,25	0,35	0,23	0,08	0,01	
Indice di danno medio per I mcs =8	0,56	0,02	0,11	0,27	0,34	0,21	0,05	
Indice di danno medio per I mcs =9	0,71	0,00	0,02	0,12	0,30	0,37	0,18	

Situazione con intervento	I _d	I _v					0,26	
		0	1	2	3	4	5	
Indice di danno medio per I mcs =6	0,20	0,32	0,41	0,21	0,05	0,01	0	
Indice di danno medio per I mcs =7	0,33	0,14	0,34	0,33	0,16	0,04	0	
Indice di danno medio per I mcs =8	0,47	0,04	0,19	0,33	0,29	0,13	0,02	
Indice di danno medio per I mcs =9	0,61	0,01	0,07	0,22	0,34	0,27	0,09	

Ta. 3.3.4.6 Indice di vulnerabilità - indice e probabilità di danno atteso

DPM - Situazione senza intervento - $I_v = 0,42$



DPM - Situazione con intervento - $I_v = 0,26$

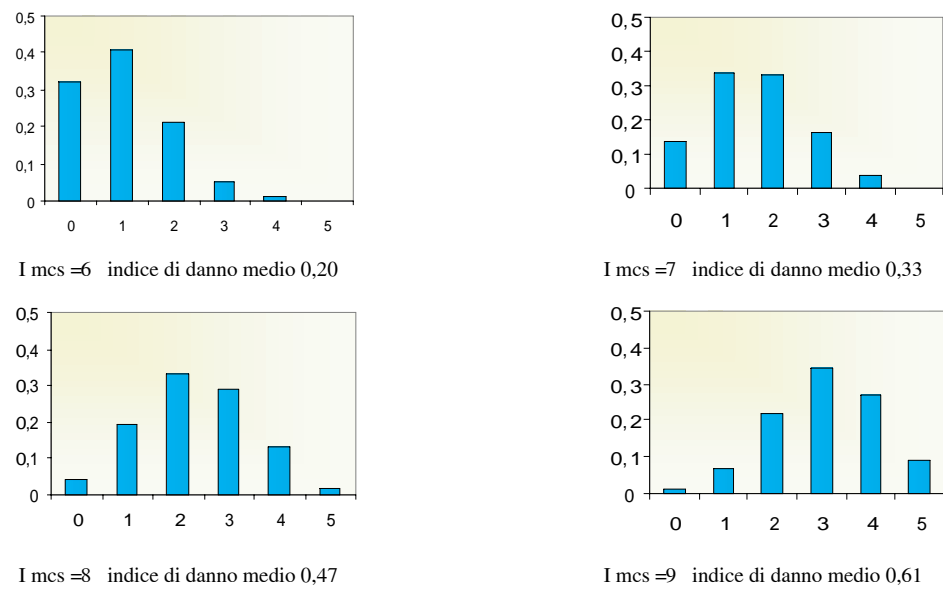


Fig. 3.3.4.3 - Matrici di probabilità di danno nella situazione senza e con intervento

Condizioni di danno e vulnerabilità per le tre chiese al momento del rilievo e nella ipotesi di intervento di miglioramento sismico

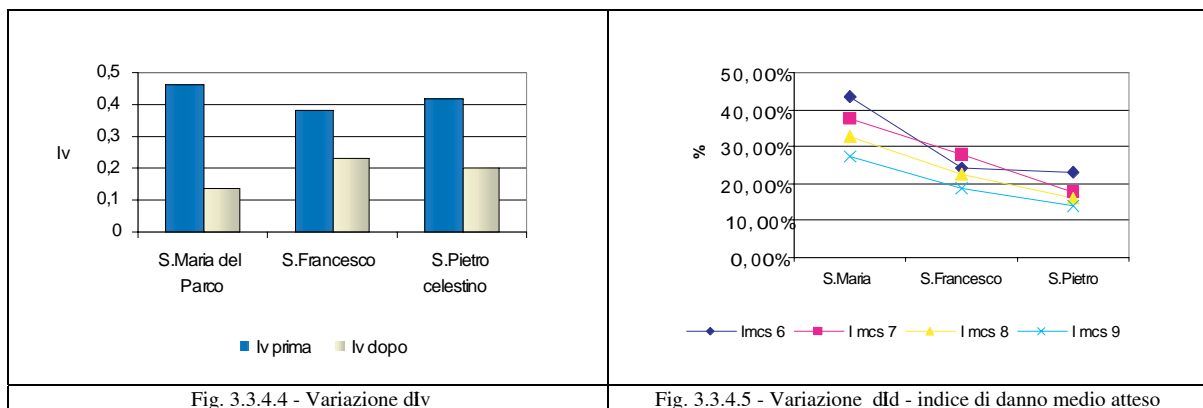
	IN ASSENZA DELL' INTERVENTO DI MIGLIORAMENTO SISMICO	S.MARIA DEL PARCO				S.FRANCESCO				S.PIETRO CELESTINO			
		M	D	V1	V2	M	D	V1	V2	M	D	V1	V2
1	RIBALTAMENTO DELLA FACCIATA	1				1				1			
Danno	distacco della facciata dalle pareti		0				0				0		
Vuln.	Ammorsamento scadente tra la facciata ed i muri della navata Assenza di catene longitudinali o di contrafforti efficaci			0	1			1	1			0	1
2	MECCANISMI NELLA SOMMITÀ DELLA FACCIATA	1				1				1			
Danno	lesioni nella zona alta della facciata		1				0				0		
Vuln.	Facciata indebolita per la presenza di grandi aperture (rosone o altro) Assenza di collegamento con la copertura, di controventi di falda o di cordoli			1	1			1	1			0	0
3	MECCANISMI NEL PIANO DELLA FACCIATA	1				1				1			
Danno	lesioni inclinate (taglio); lesioni verticali o arcuate (rotazione)		1				0				0		
Vuln.	Presenza di molte aperture (anche tamponate) Possibilità di rotazioni dalle pareti laterali (copertura spingente, volta non incatenata)			1	1			1	1			0	1
4	RISPOSTA TRASVERSALE DELL'AULA O DEL TRANSETTO	1				1				1			
Danno	lesioni negli archi (con eventuale prosecuzione nella volta); rotazioni, schiacciamenti o lesioni alla base delle pareti di navata		0				0				0		
Vuln.	Pareti laterali di elevata snellezza Assenza di catene trasversali o di contrafforti efficaci			0	0			0	0			0	1
6	VOLTE DELLA NAVATA CENTRALE	1				1				1			
Danno	lesioni nelle volte dell'aula centrale, sconnessioni degli archi		0				0				0		
Vuln.	Volte eccessivamente ribassate e/o snelle Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura			0	1			0	0			0	0
7	VOLTE DEL TRANSETTO	1				1				0			
Danno	lesioni nelle volte o sconnessioni dagli archi		0				0				0		
Vuln.	Volte eccessivamente ribassate e/o snelle Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura			0	1			0	0			0	0
8	ARCHI TRIONFALI (DELL'AULA E DEI TRANSETTI)	1				1				1			
Danno	lesioni nell'arco, scorrimento di conci, schiacciamento alla base dei piedritti		0				0				0		
Vuln.	Arco di spessore inadeguato o realizzato con muratura scadente Incatenamento assente o mal posizionato; pareti di taglio deboli			0	1			0	1			0	1
9	CUPOLA O TIBURIO	0				1				1			
Danno	lesioni nella cupola (ad arco), nel tamburo o nella lanterna		0				0				0		
Vuln.	Tamburo molto alto e caratterizzato da grandi aperture Assenza di cerchiatura o di contrafforti esterni			0	0			0	1			0	1
10	RIBALTAMENTO DI ALTRE PARETI DI ESTREMITÀ (TRANSETTO, CAPPELLE)	1				1							
Danno	distacco delle pareti di estremità dalle pareti ortogonali		0				0				0		
Vuln.	Ammorsamento scadente tra la parete di estremità ed i muri ortogonali Assenza di catene o di contrafforti efficaci			0	1			1	1			0	1
11	RIBALTAMENTO DELL'ABSIDE (O DEL PRESBITERIO)	1				1							
Danno	lesioni verticali o arcuate nelle pareti dell'abside		0				0				0		
Vuln.	Assenza di cerchiatura o di catene longitudinali Copertura spingente o forte indebolimento per la presenza di aperture nelle pareti			1	0			1	1			1	1
12	VOLTE DEL PRESBITERIO O DELL' ABSIDE	1				1							
Danno	lesioni nella volta o nel catino absidale		0				0				0		
Vuln.	Volte eccessivamente ribassate e/o snelle Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura			0	0			0	0			1	0
13	ROTTURA A TAGLIO DELLE PARETI	1				1							
Danno	lesioni inclinate (singole o incrociate); lesioni attraverso discontinuità locali (vecchie aperture tamponate, ecc.)		0				0				0		
Vuln.	Muratura di qualità scadente o di limitato spessore Forti indebolimenti per la presenza di aperture (anche preesistenti e tamponate)			0	0			0	0			0	0
14	MECCANISMI NEGLI ELEMENTI DI COPERTURA	1				1							
Danno	lesioni vicino alle teste delle travi lignee; scorrimenti delle stesse; sconnessioni tra cordoli e muratura; movimenti significativi del manto		1				0				0		
Vuln.	Copertura spingente; aumento del peso originario a seguito del rifacimento della copertura Assenza di collegamento delle travi lignee alla muratura o di ammorsamento del cordolo			1	1			0	0			1	1
15	INTERAZIONI IN PROSSIMITÀ DI IRREGOLARITÀ PLANO-ALTIMETRICHE	0				1							
Danno	movimenti nel giunto o lesioni nella muratura per martellamento lesioni verticali nel corpo meno rigido, rotazioni nel corpo più alto		0				0				0		
Vuln.	Mancanza di connessione tra le murature o elevata differenza di rigidezza tra i due corpi Assenza di un buon ammorsamento o di catene di collegamento			0	0			0	1			0	0
16	TORRE CAMPANARIA	1				1							
Danno	lesioni vicino allo stacco dal corpo della chiesa; lesioni a taglio e scorrimento; lesioni verticali (espulsione di un angolo)		0				0				0		
Vuln.	Mancanza di connessione tra le murature o torre molto snella Muratura degradata, di scadente qualità o di limitato spessore			0	0			0	0			0	0
17	CELLA CAMPANARIA	1				1							
Danno	lesioni negli archi; rotazioni o scorrimenti dei piedritti		0				0				0		
Vuln.	Assenza di catene o cerchiatura; piedritti molto snelli Copertura pesante e/o spingente			0	1			0	0			0	0
18	AGGETTI (VELA, GUGLIE, PINNACOLI, STATUE)	0				0							
Danno	evidenza di rotazioni permanenti o di scorrimenti		0				0				0		
Vuln.	Assenza di contrafforti o di altri collegamenti efficaci alla fabbrica Elevata snellezza dell' oggetto			0	0			0	0				
	TOTALI	14	3	4	9	17	0	5	8	13	0	3	8
	INDICE DI VULNERABILITÀ	0.46				0.38				0.42			

	IN PRESENZA DI INTERVENTO DI MIGLIORAMENTO SISMICO	S.MARIA DEL PARCO				S.FRANCESCO				S.PIETRO CELESTINO			
		M	D	V1	V2	M	D	V1	V2	M	D	V1	V2
1	RIBALTAMENTO DELLA FACCIATA	1				1				1			
Danno	distacco della facciata dalle pareti		0				0				0		
Vuln.	Ammorsamento scadente tra la facciata ed i muri della navata Assenza di catene longitudinali o di contrafforti efficaci			0	0			1	0			0	0
2	MECCANISMI NELLA SOMMITÀ DELLA FACCIATA	1				1				1			
Danno	lesioni nella zona alta della facciata		0				0				0		
Vuln.	Facciata indebolita per la presenza di grandi aperture (rosone o altro) Assenza di collegamento con la copertura, di controventi di falda o di cordoli			1	0			1	0			0	0
3	MECCANISMI NEL PIANO DELLA FACCIATA	1				1				1			
Danno	lesioni inclinate (taglio); lesioni verticali o arcuate (rotazione)		0				0				0		
Vuln.	Presenza di molte aperture (anche tamponate) Possibilità di rotazioni dalle pareti laterali (copertura spingente, volta non incatenata)			1	0			1	1			0	1
4	RISPOSTA TRASVERSALE DELL'AULA O DEL TRANSETTO	1				1				1			
Danno	lesioni negli archi (con eventuale prosecuzione nella volta); rotazioni, schiacciamenti o lesioni alla base delle pareti di navat		0				0				0		
Vuln.	Pareti laterali di elevata snellezza Assenza di catene trasversali o di contrafforti efficaci			0	0			0	0			0	0
6	VOLTE DELLA NAVATA CENTRALE	1				1				1			
Danno	lesioni nelle volte dell'aula centrale o sconnessioni dagli archi		0				0				0		
Vuln.	Volte eccessivamente ribassate e/o snelle Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura			0	1			0	0			0	0
7	VOLTE DEL TRANSETTO	1				1				0			
Danno	lesioni nelle volte o sconnessioni dagli archi		0				0				0		
Vuln.	Volte eccessivamente ribassate e/o snelle Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura			0	1			0	0			1	0
8	ARCHI TRIONFALI (DELL'AULA E DEI TRANSETTI)	1				1				1			
Danno	lesioni nell'arco, scorrimento di conci, schiacciamento alla base dei piedritti		0				0				0		
Vuln.	Arco di spessore inadeguato o realizzato con muratura scadente Incatenamento assente o mal posizionato; pareti di taglio deboli			0	0			0	0			0	0
9	CUPOLA O TIBURIO	0				1				1			
Danno	lesioni nella cupola (ad arco), nel tamburo o nella lanterna		0				0				0		
Vuln.	Tamburo molto alto e caratterizzato da grandi aperture Assenza di cerchiatura o di contrafforti esterni			0	0			0	1			0	1
10	RIBALTAMENTO DI ALTRE PARETI DI ESTREMITÀ (TRANSETTO, CAPPELLE)	1				1							
Danno	distacco delle pareti di estremità dalle pareti ortogonali		0				0				0		
Vuln.	Ammorsamento scadente tra la parete di estremità ed i muri ortogonali Assenza di catene o di contrafforti efficaci			0	0			1	0			0	0
11	RIBALTAMENTO DELL'ABSIDE (O DEL PRESBITERIO)	1				1							
Danno	lesioni verticali o arcuate nelle pareti dell'abside		0				0				0		
Vuln.	Assenza di cerchiatura o di catene longitudinali Copertura spingente o forte indebolimento per la presenza di aperture nelle pareti			0	0			0	1			0	1
12	VOLTE DEL PRESBITERIO O DELL'ABSIDE	1				1							
Danno	lesioni nella volta o nel catino absidale		0				0				0		
Vuln.	Volte eccessivamente ribassate e/o snelle Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura			0	0			0	0			1	1
13	ROTTURA A TAGLIO DELLE PARETI	1				1							
Danno	lesioni inclinate (singole o incrociate); lesioni attraverso discontinuità locali (vecchie aperture tamponate, ecc.)		0				0				0		
Vuln.	Muratura di qualità scadente o di limitato spessore Forti indebolimenti per la presenza di aperture (anche preesistenti e tamponate)			0	0			0	0			0	0
14	MECCANISMI NEGLI ELEMENTI DI COPERTURA	1				1							
Danno	lesioni vicino alle teste delle travi lignee; scorrimenti delle stesse; sconnessioni tra cordoli e muratura; movimenti significativi del manto		0				0				0		
Vuln.	Copertura spingente; aumento del peso originario a seguito del rifacimento della copertura Assenza di collegamento delle travi lignee alla muratura o di ammorsamento del cordolo			0	0			0	0			1	0
15	INTERAZIONI IN PROSSIMITÀ DI IRREGOLARITÀ PLANO-ALTIMETRICHE	0				1							
Danno	movimenti nel giunto o lesioni nella muratura per martellamento lesioni verticali nel corpo meno rigido, rotazioni nel corpo più alto		0				0				0		
Vuln.	Mancanza di connessione tra le murature o elevata differenza di rigidezza tra i due corpi Assenza di un buon ammorsamento o di catene di collegamento			0	0			0	1			0	0
16	TORRE CAMPANARIA	1				1							
Danno	lesioni vicino allo stacco dal corpo della chiesa; lesioni a taglio e scorrimento; lesioni verticali (espulsione di un angolo)		0				0				0		
Vuln.	Mancanza di connessione tra le murature o torre molto snella Muratura degradata, di scadente qualità o di limitato spessore			0	0			0	0			0	0
17	CELLA CAMPANARIA	1				1							
Danno	lesioni negli archi; rotazioni o scorrimenti dei piedritti		0				0				0		
Vuln.	Assenza di catene o cerchiatura; piedritti molto snelli Copertura pesante e/o spingente			0	0			0	0			0	0
18	AGGETTI (VELA, GUGLIE, PINNACOLI, STATUE)	0				0							
Danno	evidenza di rotazioni permanenti o di scorrimenti		0				0				0		
Vuln.	Assenza di contrafforti o di altri collegamenti efficaci alla fabbrica Elevata snellezza dell'aggetto			0	0			0	0				
	TOTALI	14	0	2	2	17	0	4	4	13	0	3	4
	INDICE DI VULNERABILITÀ'	0.14				0.23				0.26			

Per la Chiesa di S.Maria del Parco, dopo l'intervento di miglioramento sismico, si ottiene una riduzione della vulnerabilità del 69% mentre per le altre due chiese, recentemente ristrutturate, la riduzione della vulnerabilità è minore (circa 38%); ciò è dovuto prevalentemente alla irreversibilità della vulnerabilità di alcuni meccanismi.

La riduzione di vulnerabilità, in base alla 3.3.3.2, comporta anche la riduzione dell'indice di danno atteso che è più significativa per valori bassi dell'intensità sismica ($I_{mcs}=6$). Nel caso di S.Maria del Parco l'indice di vulnerabilità varia da $I_v=0.46$ a $I_v=0.14$ e di conseguenza l'indice di danno medio atteso varia, per $I_{mcs}=6$ da $I_d=0.30$ (livello 2 - danno medio) a $I_d=0.17$ (livello 1 - danno trascurabile), con una riduzione del 43%, e per $I_{mcs}=9$ da $I_d=0.76$ (livello 4 - danno molto grave) a $I_d=0.55$ (livello 3 - danno grave) con una riduzione del 27%.

Per le altre due chiese invece la riduzione di I_d è di circa il 24% per $I_{mcs}=6$ e di circa il 15% per $I_{mcs}=9$.



Note al paragrafo 3.3.4

- (1) Podestà S., *Risposta sismica d'antichi edifici religiosi in muratura: sviluppo di nuovi modelli per l'analisi di vulnerabilità*, Tesi di Dottorato –Università di Pavia, 2001.
- (2) Giuffrè A., 1993, *Sicurezza e conservazione dei centri storici: Il caso Ortigia*, Editrice Laterza, Bari.
- (3) Il programma è stato sviluppato dall'Unità di Ricerca del DISEG, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Genova, coordinata dal prof. Sergio Lagomarsino, sulla base di una Convenzione di Ricerca con la Regione Marche nel 1999, a seguito degli eventi sismici del 1997.
- (4) Brun S., Giovinazzi S., Idri C., Lagomarsino S., Penna A., Podestà S., Resemini S., Rossi B., *Modelli di calcolo per il miglioramento sismico delle chiese* Atti del IX Convegno Nazionale *L'Ingegneria Sismica in Italia* Torino 1999
- (5) Lagomarsino S., Podestà S., Resemini S., *Seismic response of historical churches* Proc. 12th European Conference on Earthquake Engineering, London 2002 (in corso di stampa)