



# TECNICA E RICOSTRUZIONE

ISSN 0040-1803

organo ufficiale dell'ordine degli ingegneri della provincia di catania



## LA SALVAGUARDIA DELLE COSTRUZIONI DI VALENZA STORICO-ARTISTICA DAL RISCHIO SISMICO LA CHIESA DI SANTA MARIA DEI RIMEDI A PALERMO

di Carmelo Russo  
Giovanni Grasso  
Giovanni Calabrese

### PREMESSA

La pubblicazione sul Supplemento Ordinario n. 54 alla Gazzetta Ufficiale n. 47 del 26 febbraio 2011 della Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 9 febbraio 2011 recante *Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008* ha concluso un percorso che, seppur già delineato dalla legge n. 64/'74<sup>1</sup>, non è stato breve e solo oggi è giunto ad essere integrato ed organico con la più generale normativa tecnica vigente.

Apertosi con il Decreto 7 agosto 1984 del Ministro per i Beni e le Attività Culturali di concerto con il Ministro dell'Interno e per il Coordinamento della Protezione Civile che prevede l'“*Istituzione presso il Ministero per i Beni Culturali e Ambientali del Comitato per la Prevenzione del Patrimonio Culturale dal Rischio Sismico*” il percorso è, ad oggi, concluso con l'art. 3 dell'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. **3431 del 3 maggio 2005** con la quale si stabilisce che *entro sei mesi dalla pubblicazione della presente ordinanza il Dipartimento della protezione civile, di concerto con il Ministero per i beni e le attività culturali definisce le linee guida per l'applicazione della normativa tecnica di cui alla presente ordinanza in relazione alle peculiari esigenze della salvaguardia del patrimonio culturale.*

In ossequio alla previsione sopra riportata sul Supplemento Ordinario n. 25 alla G.U.R.I. n. 24 del 29 gennaio 2008 è stata pubblicata la Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 12 ottobre 2007 *Per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni* che è stato necessario armonizzare con le intervenute nuove *Norme Tecniche per le costruzioni* di cui al D.M. Ministero delle infrastrutture del 14 gennaio 2008, pubblicato sul supplemento ordinario n. 30 della G.U.R.I. n. 29 del 4 febbraio 2008

Il documento dal titolo *Schema di Direttiva del Presidente del Consiglio inerente l'allineamento delle “Linee Guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale” alle nuove Norme Tecniche sulle costruzioni di cui al D.M. 14 Gennaio 2008*, è stato approvato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici nell'assemblea del 23 luglio 2010.

Il progetto di consolidamento della Chiesa di Santa Maria dei Rimedi, affrontato nel 2008, si inquadra nel panorama normativo vigente in quell'anno, pertanto quando non era stata ancora pubblicata la Circolare 2 febbraio 2009 n. 617 e le Linee Guida 2011. L'analisi cinematica eseguita per accertare il grado di vulnerabilità sismica della chiesa è stata condotta secondo le indicazioni delle Linee Guida 2008 e gli allegati all'OPCM 3274/2003. La metodologia è identica, cambiano solo alcuni parametri e formule applicative, espressi in maniera diversa senza variazioni sostanziali. Nel seguito si farà uso costante di indicazioni della normativa impiegata con l'avvertenza che testo, parametri e formule contenuti nelle *Linee Guida* pubblicate sulla G.U. n.24 del 29 gennaio 2008 e negli allegati all'O.P.C.M. 3274 che saranno citati trovano esatta conferma, rispettivamente, nelle *Linee Guida 2011* e nell'appendice C8A al Cap. 8 *Costruzioni Esistenti* della Circolare 2 febbraio 2009 n. 617 *Istruzioni per l'applicazione delle Nuove Norme Tecniche di Costruzione*: nel corso delle verifiche eseguite e di seguito illustrate saranno opportunamente indicati la normativa e i testi impiegati; le note indicheranno altra normativa in cui sono contenuti parametri e formule coincidenti per significato ed applicazione.

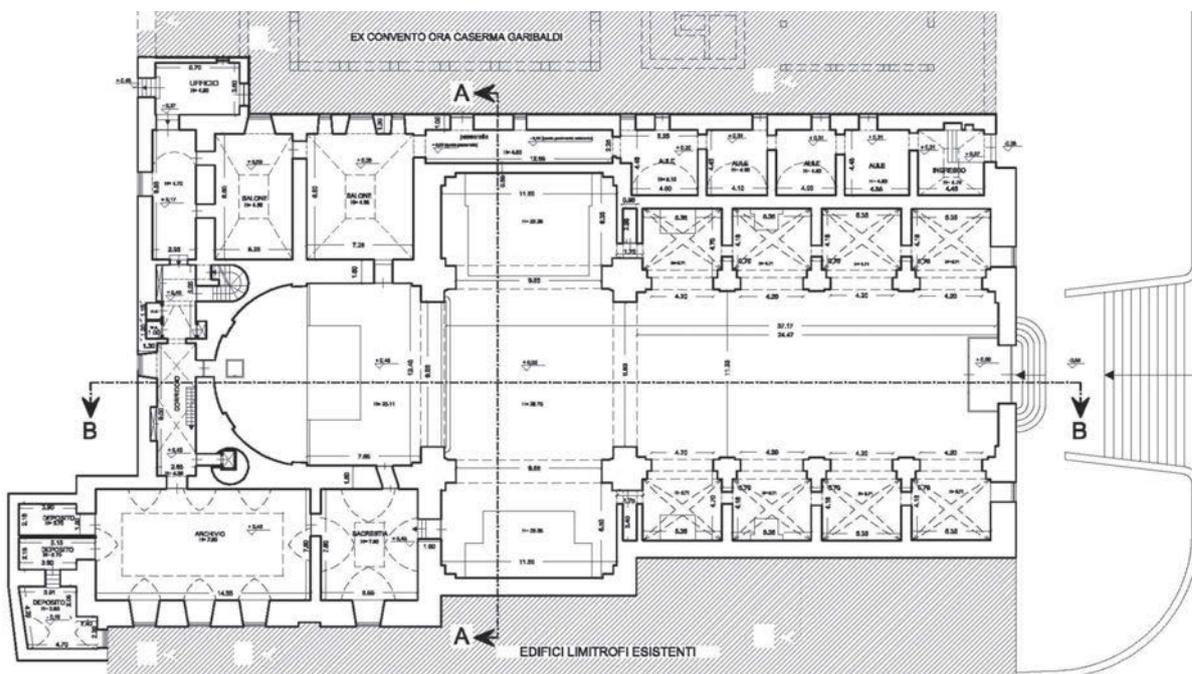
<sup>1</sup> Art. 16 della legge n. 64/'74 - *Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche*- già dalla sua emanazione prevedeva che *Per l'esecuzione di qualsiasi lavoro di riparazione in edifici o manufatti di carattere monumentale o aventi, comunque, interesse archeologico, storico o artistico, siano essi pubblici o di privata proprietà, restano ferme le disposizioni vigenti in materia,*

## DESCRIZIONE GENERALE DELL'EDIFICIO

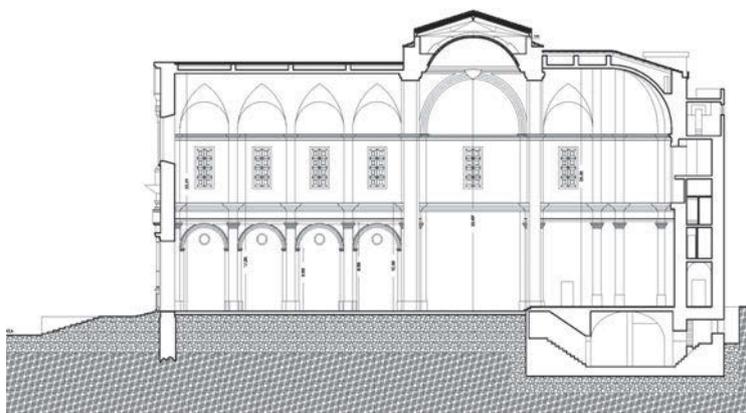
La chiesa di Santa Maria dei Rimedi, edificata nel XVII secolo, presenta una pianta a croce latina, ad unica navata fiancheggiata da quattro cappelle per lato. Il presbiterio termina con un'abside semicircolare, mentre il transetto è di poco sporgente rispetto alla larghezza complessiva della navata con le cappelle. L'incrocio tra il transetto e la navata è sormontato da un tiburio ottagonale racchiudente una volta emisferica non reale.

Navata, transetto e presbiterio sono coperte con volte a botte lunettate, realizzate in conci di pietra. Le lunette non sono molto pronunciate e non servono per inquadrare i finestrini del claristorio, i quali si trovano al disotto del cornicione d'imposta delle volte.

Il corpo centrale della navata è piuttosto slanciato rispetto ai corpi laterali racchiudenti le cappelle, ragion per cui i costruttori del tempo hanno ritenuto opportuno (in ciò dimostrando di conoscere bene la regola dell'arte) di introdurre dei contrafforti per ogni campata che impedissero il ribaltamento delle pareti longitudinali della navata.



Il tetto è costituito da un'orditura principale di arcarecci in legno poggianti su timpani in muratura impostati direttamente sulla volta in conci di pietra, sormontati a loro volta da un cordolo in conglomerato cementizio (intervento risalente alla metà del XX secolo sul transetto e sul presbiterio). La spinta degli archi-timpani e delle volte è contrastata, nella navata, da catene metalliche (di sezione rettangolare di circa 15x50 mm) poste poco più sotto della sezione alle reni.



La chiesa fa parte di un complesso edilizio più ampio costituito dal convento attiguo al lato nord (oggi adibito a caserma), e da una serie di ambienti su più livelli che contornano il presbiterio e l'abside lungo i lati sud e sud-ovest.

Oltre a questi corpi edilizi, nel tempo altri edifici d'abitazione, in muratura, a due elevazioni, si sono addossati al lato sud della chiesa determinando la formazione di un aggregato edilizio.

## CRITERI GENERALI DI ANALISI E VERIFICA

Le verifiche di sicurezza per gli edifici esistenti, secondo quanto stabilito al paragrafo 8.3 delle N.T.C. di cui al DM 14 gennaio 2008, “*possono essere eseguite rispetto alla condizione di salvaguardia della vita umana (SLV) o, in alternativa, alla condizione di collasso (SLC)*”.

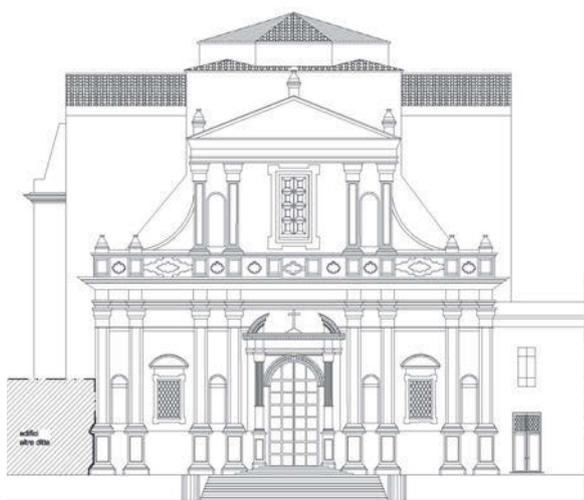
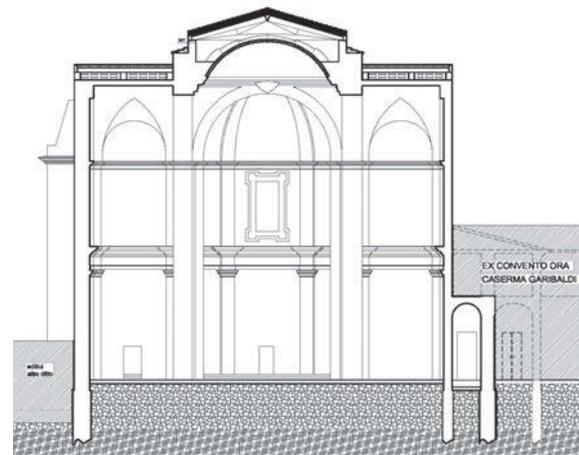
Come evidenziato al paragrafo 8.4. delle suddette N.T.C. *per i beni di interesse culturale in zone dichiarate a rischio sismico, ai sensi del comma 4 dell’art.29 del DLgs 22-01-2004 n.42 “Codice dei beni culturali e del paesaggio”, è in ogni caso possibile limitarsi ad interventi di miglioramento effettuando la relativa valutazione della sicurezza.*

Tanto la versione 2008 che quella 2011 delle *Linee Guida*, al medesimo paragrafo 2.3 indicano *per i manufatti architettonici di interesse storico artistico il rispetto degli SLU - di salvaguardia della vita (SIV) e di collasso (SLC) – come limite per il raggiungimento di un sufficiente livello di sicurezza e protezione nei riguardi del rischio sismico.*

Le conoscenze acquisite circa i meccanismi di rottura che hanno portato al danneggiamento o al collasso di un gran numero di chiese nel territorio italiano in occasione dei principali eventi sismici accaduti durante gli ultimi 20-30 anni hanno consentito agli studiosi di accertare come *il comportamento sismico di questa tipologia di edifici possa essere interpretato attraverso la loro scomposizione in porzioni architettoniche (denominate macroelementi), caratterizzate da una risposta strutturale sostanzialmente autonoma rispetto alla chiesa nel suo complesso (facciata, aula, abside, campanile cupola, arco trionfale, ecc)* <sup>2</sup>.

I danni monitorati sui singoli macroelementi sono il più delle volte interpretabili come dovuti a perdita di equilibrio di porzioni di muratura.

Le singole porzioni murarie si comportano come corpi rigidi e pertanto, più che un’analisi condotta su modelli ad elementi finiti, risultano più efficaci metodi di verifica riferiti ai singoli meccanismi locali (nel piano e fuori



piano) *svolti tramite l’analisi limite dell’equilibrio secondo l’approccio cinematico che si basa sulla scelta del possibile meccanismo di collasso e sulla valutazione dell’azione orizzontale che attiva tale cinematicismo*<sup>3</sup>.

Le *Linee Guida* 2008, per l’applicazione dell’analisi limite dell’equilibrio, rimandano all’allegato 11.C all’Ordinanza P.C.M. 3274 del 20 marzo 2003 e s.m.i., in cui sono descritti i metodi dell’analisi cinematica lineare<sup>4</sup> e non lineare<sup>5</sup> per le verifiche dei meccanismi locali di collasso in edifici esistenti in muratura.

L’adozione dei metodi suddetti dipende pertanto dall’individuazione del meccanismo (o dei meccanismi) di collasso possibile.

<sup>2</sup> Par. 5.4.3 delle *Linee Guida* 2008 e 2011. L’unica differenza nel testo 2011 rispetto a quello 2008 consiste nella citazione del punto C8A.4 della Circolare 2 febbraio 2009 rispetto all’Allegato 11.C dell’Ordinanza 3274 e s.m.i.

<sup>3</sup> Vedi allegato 11.C all’OPCM 3274 e s.m.i. *Analisi dei meccanismi locali di collasso in edifici esistenti in muratura e C8A.4 della Circolare 2 febbraio 2009 n. 617 che reca lo stesso titolo*

<sup>4</sup> Integralmente riversati in C8.4.1 dell’Appendice al capitolo C8 della Circolare 2 febbraio 2009 n. 617

<sup>5</sup> Integralmente riversati in C8.4.2 dell’Appendice al capitolo C8 della Circolare 2 febbraio 2009 n. 617

Nel caso delle chiese tale individuazione non risulta particolarmente difficoltosa proprio grazie all'approfondita conoscenza sulle modalità di danneggiamento di tali edifici che gli studi compiuti e il rilievo sistematico dei danni, a seguito degli eventi sismici succedutisi negli anni, hanno consentito di accumulare.

L'analisi cinematica porta all'individuazione di un coefficiente che rappresenta un moltiplicatore, inteso come rapporto tra le forze orizzontali applicate e i corrispondenti pesi delle masse presenti.

Il moltiplicatore va confrontato con un altro coefficiente rappresentativo dell'entità dell'azione sismica attesa nel sito. Tali coefficienti (moltiplicatori) possono essere facilmente messi in relazione con i corrispondenti valori delle accelerazioni spettrali sismiche..

I meccanismi di danno analizzati, con riferimento ai macroelementi individuati in accordo all'Allegato C delle Linee Guida (2008 e 2011), sono stati i seguenti <sup>5bis</sup>:

- **meccanismi nel piano della facciata: rottura a taglio per azioni complanari;**
- **ribaltamento della parete della navata contraffortata;**
- **risposta trasversale dell'aula;**
- **ribaltamento delle pareti di estremità del transetto;**
- **risposta longitudinale delle pareti del transetto;**
- **arco-timpano in copertura della navata;**
- **arco-timpano in copertura del transetto;**
- **arco-timpano in copertura del presbiterio;**
- **volte della navata centrale;**
- **volte del transetto;**
- **volte del presbiterio;**
- **arco trionfale all'incrocio tra navata e transetto**

Le analisi e le verifiche svolte, riguardanti i macroelementi individuati come sopra, sono state condotte attraverso il confronto tra i momenti ribaltanti e quelli stabilizzanti per quel che riguarda le pareti della navata, la testata del transetto sinistro (con e senza la porzione di muratura trasversale afferente) la testata del transetto destro, mentre è stato impiegato il Principio dei Lavori Virtuali - che consente di studiare meccanismi più complessi – per le verifiche riguardanti la sezione trasversale della navata, il transetto e l'arco trionfale sottoposto al sisma in direzione  $-X$  e  $+X$ , come illustrato nell'allegato 11.C. all'Ordinanza P.C.M. 3274 del 20 marzo 2003 e s.m.i., confermato nel testo, definizioni e formule dal C8A.4.1 *Analisi cinematica lineare* dell'Appendice al Capitolo 8 della Circolare 2 febbraio 2009 n. 617.

Il P.L.V. è stato applicato anche per la ricerca di eventuali cinematismi innescati dalla formazione di cerniere intermedie comprese tra il piede della muratura e la quota del nodo trattenuto da tiranti.

Con riferimento ai *Livelli di valutazione della sicurezza sismica* di cui al par. 5.3 delle *Linee Guida* (2008 e 2011), le verifiche svolte hanno consentito una valutazione LV2, come definita al par. 5.3.2 delle *Linee Guida* (2008 e 2011).

Con validità generale per le verifiche eseguite si segnala che la formula

$$a_0^* \geq a_g \times S/q \times (1 + 1,5 \times Y/H)$$

è la 11.C.8 dell'allegato 11.C all'Ordinanza 3274 e s.m.i. e trova analogia con quelle al par. C8A.4.2.3 dell'Appendice al C8 della Circolare 2 febbraio 2009 n. 617

**con**

$a_0^*$  = accelerazione spettrale che attiva il meccanismo

**e**

$a_g$  = accelerazione orizzontale massima al sito

S = Fattore che tiene conto della categoria del suolo di fondazione

q = Fattore di struttura = 2, come indicato nell'Allegato 11.C dell'Ordinanza 3274 e s.m.i., ma anche al par. C8A.4.2.3 dell'Appendice al C8 della Circolare 2 febbraio 2009 n. 617

<sup>5bis</sup> Il meccanismo di ribaltamento della facciata non è stato analizzato perchè oggetto di un precedente intervento

## MATERIALI E TECNICHE COSTRUTTIVE

La muratura con cui è costruita la chiesa di Santa Maria dei Rimedi rientra nella consuetudine palermitana di utilizzare blocchi di pietra squadrata. Il materiale corrente è costituito da calcari sedimentari estratti dalle cave locali, di colore prevalentemente giallastro, in particolare dalla calcarenite conchiglifera nota come *tufo dell'Aspra*, che per le sue caratteristiche di tenacità si presta facilmente a lavorazioni manuali e quindi alla facile riduzione in blocchi squadrati. Proprio la facile lavorabilità della pietra calcarea suddetta è stata all'origine della grande diffusione nell'edilizia palermitana; in particolare, come molti studi dimostrano, è molto diffuso il muro apparecchiato con blocchi a tutto spessore in filari regolari, che ebbe larga diffusione nel XVIII e nel XIX secolo.<sup>6</sup>

Le volte che sovrastano la navata, il transetto e il presbiterio sono volte *reali* apparecchiate con conci di pietra calcarea sbazzata, destinata all'intonaco.

La volta emisferica che sovrasta l'incrocio tra la navata e il transetto è invece realizzata in canne e gesso.

Il tetto è costituito da un'orditura di arcarecci in legno uso trieste che poggiano su timpani in muratura e conglomerato cementizio ciclopico costruiti sulle volte. L'interasse dei timpani posti sul presbiterio è di circa 2.80 m, mentre quelli posti sul transetto è di circa 3.50 m.

Il tiburio ottagonale che racchiude la volta all'incrocio tra l'aula e il transetto è coperto con una copertura piramidale a base ottagonale sorretta da capriate "Polonceau" disposte a raggiera.

Dai pozzetti di ispezione eseguiti si è potuto riscontrare che la muratura di fondazione è della stessa tipologia di quella in elevazione. Il piano di posa è stato localizzato a circa 2,70-3,00 m di profondità rispetto al piano di calpestio della chiesa.

Due saggi eseguiti sulle pareti della cripta sottostante il presbiterio hanno messo in evidenza come esse siano costituite non da muratura in conci, bensì dal substrato roccioso calcareo opportunamente scavato. Un sondaggio ha messo in evidenza un substrato di colore rossastro mentre l'altro saggio ha intercettato un substrato di colore giallo. L'aula della chiesa presenta, su ogni campata, catene metalliche poste poco al disotto delle reni della volta. Tali catene servono a contrastare la spinta della volta e degli archi-timpani sovrastanti. I capochiave esterni non sono visibili in quanto, con molta probabilità sono inglobati nei contrafforti che si ergono lateralmente all'aula centrale.

## CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI MATERIALI

Per quanto riguarda i parametri fisico-meccanici della muratura si è fatto riferimento ai parametri *fisico-meccanici di cui all'Ordinanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri 20 marzo 2003 n.3274 e s.m.i., allegato 11.D*, tabb. 11.D.1 e 11.D.2<sup>7</sup>

In base al "livello di conoscenza" acquisito è stato individuato il relativo fattore di confidenza.

Per la verifica degli archi in conci di pietra, non disponendo di dati sperimentali sulla resistenza del materiale lapideo desunti da indagini specifiche condotte in situ, si è fatto riferimento a dati desunti dalla letteratura tecnica che per i calcari teneri offrono i seguenti valori di resistenza media a compressione (in kg/cmq):

F. Iacobelli:  $10 \leq R_{\text{comp}} \leq 500$  (per tufi calcarei)<sup>8</sup>

N. Augenti:  $25 \leq R_{\text{comp}} \leq 80$  (per tufi calcarei)<sup>9</sup>

C. Valore:  $30 \leq R_{\text{comp}} \leq 190$  (per calcareniti del sottosuolo di Palermo)<sup>10</sup>

<sup>6</sup> Cfr. Paolo Marconi, *Manuale del recupero del centro storico di Palermo*, Flaccovio Ed., Palermo 1997.

<sup>7</sup> La tab. C8A.2.1 dell'Appendice C8.A alla Circolare 2 febbraio 2009 n. 617 conferma i valori della tab. 11.D.1 riguardo a  $\sigma$  (resistenza media a taglio), E (valore medio del modulo di elasticità normale), G (valore medio del modulo di elasticità tangenziale), eW (peso specifico medio della muratura), mentre eleva quelli riguardanti  $f_m$  (resistenza media a compressione della muratura)

La tab. C8A.2.2 dell'Appendice C8.A alla Circolare 2 febbraio 2009 n. 617 corrisponde alla tab. 11.D.2 dell'allegato 11.D all'OPCM 3274 e s.m.i., riducendone le tipologie di murature, ma ampliandone alcune particolari caratteristiche. Restano invariati tuttavia i valori dei coefficienti correttivi per corrispondenti tipologie di murature ed analoghe caratteristiche.

Come si vede le calcareniti tenere sono caratterizzate da una grande variabilità dei valori di resistenza a compressione uniassiale. In particolare gli studi condotti sulle calcareniti di Palermo hanno evidenziato una forte dipendenza della resistenza a compressione dalla porosità del materiale. Più compatto è il materiale e più alte sono le caratteristiche di resistenza a compressione.

A vantaggio di sicurezza si è assunto, per le verifiche, il valore:

$$R_{\text{compr}} = 40 \text{ kg/cmq.}$$

Il coefficiente parziale di sicurezza utilizzato nelle verifiche di resistenza delle strutture murarie, secondo il disposto del punto 7.8.1.1. ultimo comma delle NTC 2008 è:

$$Y_M = 2$$

Per gli interventi di consolidamento degli archi-timpani, mediante realizzazione di contrarco in mattoni, le verifiche sono state condotte tenendo conto dei valori di resistenza dell'arco esistente in conci di pietra.

Di seguito si riporta una tabella con le caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali utilizzati in progetto.

**TAB.1 Caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali impiegati negli interventi di consolidamento.**

- Calcestruzzo classe C20/25
- Barre ad aderenza migliorata tipo B450C
- Barre in acciaio inox ad aderenza migliorata tipo B450C
- Profilati e lamiere in acciaio per piastre tipo S275
- Barre in acciaio Dywidag 835/1030
- Legno lamellare tipo BS11
- Tessuto in fibra di carbonio unidirezionale:
  - Resistenza a trazione >4300 N/mmq
  - Larghezza tessuto :300mm
  - Spessore singolo strato di tessuto : 0,131mm
  - Spessore di progetto, tessuto in doppio strato: 0,262mm
- Muratura in mattoni pieni 5.5x12x25 per **cordoli**:
  - resistenza caratteristica a compressione dell'elemento  $f_{bk} > 20 \text{ N/mmq}$
  - tipo di malta: M5
- Per la realizzazione degli **archi in mattoni pieni** è prescritto l'utilizzo di malta a prestazione garantita di classe M10 o superiore

#### LIVELLI DI CONOSCENZA E FATTORI DI CONFIDENZA

In base al "livello di conoscenza" acquisito è stato individuato il relativo fattore di confidenza da utilizzare come ulteriore coefficiente di sicurezza.

Di seguito si riporta il livello di conoscenza e il fattore di confidenza estrapolati dalle indicazioni contenute al paragrafo 4.2. e dalla tabella 4.1 delle *Linee Guida 2008*<sup>11</sup>

Livello di conoscenza	Fattore di confidenza (FC)
<b>LC1: conoscenza limitata</b>	<b>1.35</b>

Sul modo di applicare il fattore di confidenza si è seguito il criterio di cui al punto 4.2. delle *Linee Guida 2008 per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*<sup>12</sup>.

<sup>8</sup> Cfr Franco Iacobelli, *Progetto e verifica delle costruzioni in muratura in zona sismica*, EPC Libri, Roma 2003.

I valori riportati sono estrapolati dalla tabella 1.1. a pag.15.

<sup>9</sup> Cfr Nicola Augenti, *Il calcolo sismico degli edifici in muratura*, UTET, Torino 2004. I valori riportati sono estrapolati dalla tabella 5.12 a pag.136.

<sup>10</sup> C.Valore, *Additional contribution to report n.2: the role of calcarenites in the urbanization of Palermo*, In "The Geotechnica of Hard Soils - Soft Rocks, Evangelista & Picarelli (eds), 2000 Balkema, Rotterdam -

## AZIONI

I valori delle azioni e le loro combinazioni considerate nel calcolo sono quelle definite nelle NTC 2008 con il criterio di cui al punto 8.5.5. In particolare, in base al rilievo geometrico-strutturale e alla conoscenza del tipo di materiale costituente la muratura, si è ritenuto di potere assegnare al coefficiente parziale dei pesi propri e dei carichi permanenti il valore:

$$Y_c = 1.00$$

Per le azioni accidentali si è fatto riferimento a quanto indicato al punto 2.6.1. delle NTC 2008 e per le combinazioni a quanto indicato al punto 2.5.3.

## ANALISI DEI DISSESTI

Il rilievo a vista del quadro fessurativo ha evidenziato quanto segue:

- 1) presenza di lesioni sub-verticali in corrispondenza dell'attacco tra i muri longitudinali della navata e la facciata della chiesa;
- 2) lesioni all'intradosso delle volte delle cappelle laterali, prima campata, e lesioni sulle pareti della prima campata che interessano anche gli archi tra la navata e le cappelle.
- 3) presenza di lesioni, visibili all'esterno, in corrispondenza dell'attacco tra il timpano del secondo ordine della facciata e i muri longitudinali della navata;
- 4) presenza di lesioni verticali in corrispondenza dell'attacco tra i muri longitudinali del transetto sx e la parete di testata del transetto;
- 5) presenza di lesioni verticali, visibili all'esterno, in corrispondenza dell'attacco tra la parete di testata del transetto e il corpo del convento a sud, all'altezza del parapetto.
- 6) presenza di lesioni all'intradosso della volta della navata in corrispondenza della sezione in chiave, con andamento parallelo alla generatrice, e in alcuni punti anche in corrispondenza di sezioni mediane tra la chiave e le reni;
- 7) lesione trasversale all'intradosso della volta della navata, parallela alla direttrice circolare, in corrispondenza del 2° pilastro a partire dalla facciata;
- 8) lesioni diffuse all'intradosso della volta del presbiterio.
- 9) Abbassamento del concio di chiave dell'arco tra la navata e il transetto per scivolamento.

Il rilievo a vista delle strutture di sostegno della copertura ha evidenziato uno stato diffuso di degrado biologico degli arcarecci in legno del transetto e del presbiterio. Verosimilmente analoghe condizioni di degrado potrebbero interessare gli arcarecci del tetto della navata (la quale risulta inaccessibile).

Il quadro fessurativo evidenziato ai punti 1, 2, 3, è da attribuire ad un meccanismo di ribaltamento della facciata. Più accentuato è il ribaltamento del timpano del secondo ordine, dovuto ad un'insufficiente o scadente connessione con i muri longitudinali della navata, situazione aggravata dal fatto che la facciata risulta più stretta della navata.

Il quadro fessurativo di cui ai punti 4 e 5 denota anch'esso un meccanismo di ribaltamento della parete di testata del transetto sx, ostacolato in parte dalla porzione di muratura del corpo di fabbrica del convento a sud, trasversale alla facciata.

Il quadro fessurativo in corrispondenza delle volte della navata denota una scarsa capacità della struttura di resistere a sismi di bassa entità, come evidenziato dalle verifiche strutturali eseguite, con formazione di lesioni lungo le zone di trazione della muratura.

<sup>11</sup> Il riferimento si conserva invariato anche rispetto alle Linee Guida 2011, vedi tabella 4.1. Vedi anche tabella C8A.1.1 dell'Appendice al capitolo C8 della Circolare 2 febbraio 2009 n. 617.

La tabella 11.1 dell'OPCM 3274 e s.m.i. indica lo stesso valore ( $FC=1,35$ ) per il livello di conoscenza LC1, ma per edifici in cemento armato, acciaio ed acciaio-calcestruzzo.

<sup>12</sup> Coincidente espressione si trova nelle Linee Guida 2011 al par. 4.2.

Le lesioni diffuse all'intradosso della volta del presbiterio e del catino absidale mostrano anch'esse una scarsa capacità di resistenza della volta al sisma, in questo caso aggravata dal reticolo di timpani e cordoli in calcestruzzo costituenti la struttura di appoggio della copertura, direttamente gravante sulla volta, con particolare concentrazione dei carichi sul catino absidale.

#### **INDAGINI GEOGNOSTICHE**

Al fine di redigere un adeguato studio geologico-tecnico è stata eseguita una serie di indagini geognostiche dirette ed indirette.

In particolare sono stati eseguiti n.4 perforazioni verticali, di cui n.3 spinte fino alla profondità di 15 m e n.1 fino alla profondità di 30 m; alcuni prelievi di campioni indisturbati prove SPT al fine di caratterizzare i litotipi rinvenuti; alcuni scavi per stabilire l'approfondimento delle strutture murarie di fondazione della chiesa rispetto al piano di calpestio attuale.

Le indagini geognostiche eseguite hanno consentito di stabilire che il substrato posto al disotto delle fondazioni della chiesa è costituito da un orizzonte litologico a comportamento semirigido, composto in prevalenza da sabbie limose addensate e/o mediamente cementate, alternate a livelli di calcareniti a consistenza litoide ma fratturate e vacuolari.

Al disotto di questo strato, a partire dalla profondità di 11.20 è stato rinvenuto un orizzonte litologico costituito da limi e limi sabbiosi, potente circa 7 m, ed un orizzonte di limi argillosi e argille limose di colore grigio-bluastro, omogenee e consistenti.

In base alla normativa antisismica vigente, il suolo di fondazione della chiesa è stato classificato come suolo di categoria C.

#### **VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA ANTISISMICA ATTRAVERSO L'ANALISI DEI MECCANISMI LOCALI DI COLLASSO E PROGETTO DEGLI INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO**

I risultati ottenuti dalle analisi svolte vengono riassunti nella tabella allegata e che consente anzitutto di individuare quali macroelementi sono stati considerati. Da sinistra, la prima colonna in tabella riporta il valore dell'accelerazione ed il riferimento della normativa secondo la quale è stata ricavata. Detto valore costituisce il dato con cui confrontare l'accelerazione di collasso dello stato di fatto: in presenza di una differenza ritenuta significativa tra la condizione di stato di fatto e quella richiesta dalla normativa sono stati ipotizzati interventi di miglioramento sismico che hanno condotto a soddisfare la richiesta della norma o ad un sensibile miglioramento delle condizioni di stato di fatto.

Per alcuni macroelementi, in talune condizioni bene individuati in tabella, sono state condotte ulteriori verifiche per accertare le condizioni sotto le quali ha luogo la formazione di una cerniera intermedia tra il piede della parete ed il 1° ordine di tiranti, tra il 1° ed il 2° ordine di tiranti, la connessione tra il cordolo sommitale e la sottostante muratura.

Tra gli altri componenti strutturali, è stata considerata con particolare riguardo la condizione di archi e volte, nelle svariate collocazioni funzionali della fabbrica: Arco-Timpano Navata, Arco-Timpano Transetto, Arco-Timpano Presbiterio, Volta Transetto, Volta Navata, Volta Presbiterio, Arco Trionfale Navata-Transetto. Data la generalità del metodo applicato, l'abaco riporta in dettaglio i risultati delle verifiche eseguite per uno solo degli archi esaminati (Arco-Timpano Navata).

Le verifiche hanno riguardato la condizione di stato di fatto, in presenza ed in assenza di sisma, e quella di progetto.

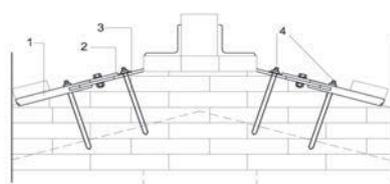
#### **INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO ANTISISMICO**

Gli interventi di miglioramento previsti in progetto sono come di seguito sintetizzabili:

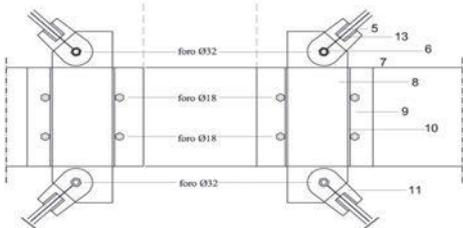
- Razionalizzazione delle strutture murarie di sostegno della copertura.
- Consolidamento delle volte portanti
- Consolidamento della volta all'incrocio navata-transetto
- Consolidamento degli archi-timpani di sostegno della copertura del transetto e del presbiterio
- Realizzazione di cordoli in muratura armata sulla sommità delle pareti murarie
- Consolidamento dell'arco tra la navata e il transetto.

- Inserimento di catene volte a contrastare il ribaltamento delle pareti di testata del transetto.
  - Inserimento di catene volte a contrastare la spinta degli archi-timpano del transetto e del presbiterio.
- Particolare attenzione è stata rivolta a migliorare le condizioni degli archi-timpano che mostravano, nella condizione dello stato di fatto, valori del moltiplicatore di collasso (correlato con l'accelerazione al suolo) di gran lunga inferiori rispetto a quelli previsti dalla normativa.
- Per dette strutture è stata prevista, sinteticamente, la rimozione del timpano soprastante, in parte in muratura ed in parte in calcestruzzo, il consolidamento dell'arco esistente mediante la realizzazione di ulteriore ghiera di mattoni pieni con interposto un nastro in fibra di carbonio e quindi la ricostruzione del timpano in muratura di mattoni pieni.

C1: COLLEGAMENTO DEL CONTROVENTO  
AL CORDOLO IN MURATURA scala 1:5

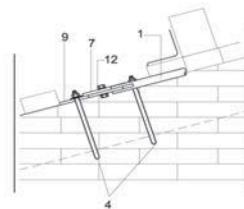


Vista laterale

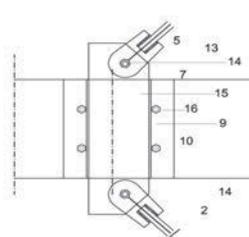


Pianta

C2: COLLEGAMENTO DEL CONTROVENTO  
AL COLMO scala:5



Vista laterale



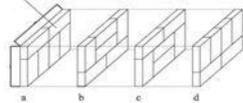
Pianta

LEGENDA

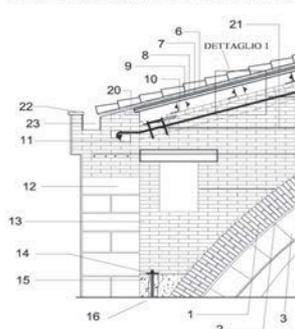
- 1- CATENA DI CONTROVENTO TONDO Ø28 IN ACCIAIO S275
- 2- PIASTRA D'ESTREMITÀ CATENE sp=15 mm
- 3- PIASTRA DI BASE IN ACCIAIO S 275 sp=15 mm
- 4- BARRE FILETTATE M16 CL 8.8 L PERFORAZIONE 30 cm INIETTATI CON RESINA EPOSSIDICA
- 5- SALDATURA A CORDONI D'ANGOLO ALTEZZA DI GOLA a=7 mm
- 6- BULLONE M30 C.L.8.8 FORO Ø31.5
- 7- PIASTRA D'ESTREMITÀ CATENE sp=15 mm
- 8- PIASTRA COLLEGAMENTO
- 9- PIASTRA DI BASE sp=10 mm
- 10- SALDATURA A CORDONI D'ANGOLO ALTEZZA DI GOLA a=9 mm
- 11- PIASTRA D'ESTREMITÀ CATENE sp=15 mm
- 12- BULLONE M30 C.L.8.8
- 13- TONDO Ø28
- 14- BULLONE M30 C.L.8.8 FORO Ø32
- 15- PIASTRA COLLEGAMENTO sp=15 mm
- 16- BARRE FILETTATE M16CL 8.8 FORI Ø18

SCHEMA APPARECCHIATURA  
COSTRUTTIVA ARCO IN MATTONI

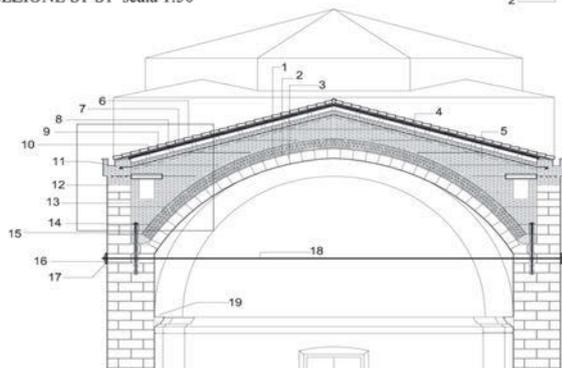
mattoni pieni 5.5x12x25 cm



STRALCIO SEZIONE S1-S1 scala 1:20



SEZIONE S1-S1 scala 1:50

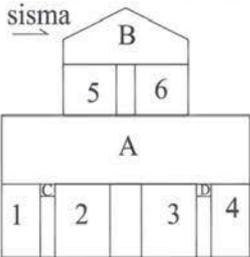
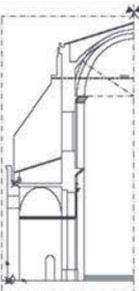
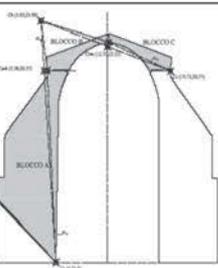
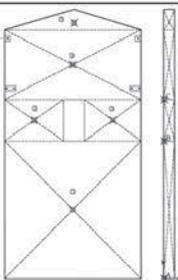
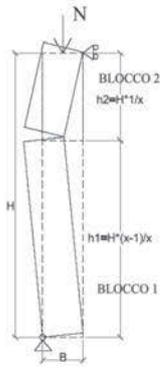


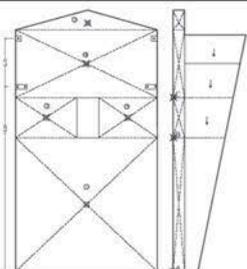
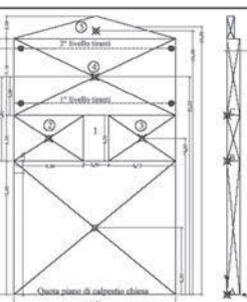
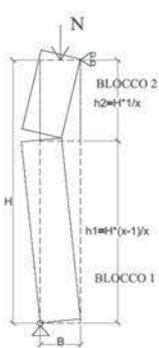
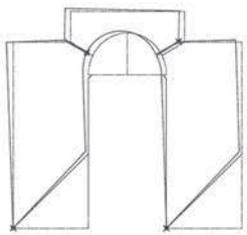
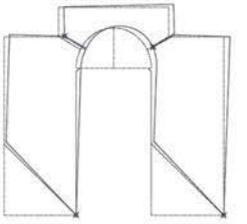
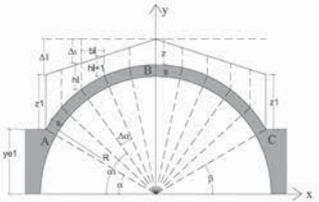
LEGENDA

- 1- CONTRARCO IN MATTONI PIENI A TRE TESTE, sp.38 cm - largh.51 cm
- 2- RINFORZO CON NASTRO MONODIREZIONALE IN CFRP, b=30 cm
- 3- ARCO ESISTENTE IN CONCI DI PIETRA CALCAREA
- 4- BARRA Ø28 ANNAGATA IN NUCLEO DI CLS
- 5- TIMPANO IN MURATURA A TRE TESTE ARMATA CON N°2 BARRE Ø10 A RICORSI DI 50-60 cm
- 6- MANTO DI COPERTURA CON COPPI SICILIANI
- 7- ONDULINA SOTTOCOPPO
- 8- TAVOLATO sp. 2.5 cm
- 9- MEZZI MURALI 8x4 cm
- 10- ARCARECCI IN LEGNO LAMELLARE sez. 12x16 cm - interasse 80 cm
- 11- NUCLEO IN CLS CON BARRA Ø28 IN ACCIAIO B450C
- 12- CORDOLO IN MURATURA DI MATTONI 5.5x12x25 ARMATA CON Ø10 A RICORSI DI 50 cm
- 13- TIRANTE Ø26.5 IN ACCIAIO DYWIDAG
- 14- PIASTRA DI ANCORAGGIO IN ACCIAIO FE430, Dim. 400x150x15mm
- 15- RIEMPIMENTO IN CLS C20/25, sp. 40 cm
- 16- N°2 BARRE Ø16 AD ADERENZA MIGLIORATA IN ACCIAIO INOX B450C ACCIAIO INOX FORI Ø21 INIETTATI CON RESINA EPOSSIDICA
- 17- CAPOCHIAVE IN ACCIAIO TIPO C2
- 18- CATENA Ø30 IN ACCIAIO S275
- 19- TIRANTE -CATENA Ø32 IN ACCIAIO DYWIDAG
- 20- DORMIENTE IN LEGNO
- 21- BARRE D'ARMATURA DELLA MURATURA 2Ø10 A RICORSI DI 50-60 cm IN LETTO DI MALTA CEMENTIZIA
- 22- COPERTINA IN PIETRA
- 23- IMPERM. GRONDA CON GUAINA AUTOPROTETTA

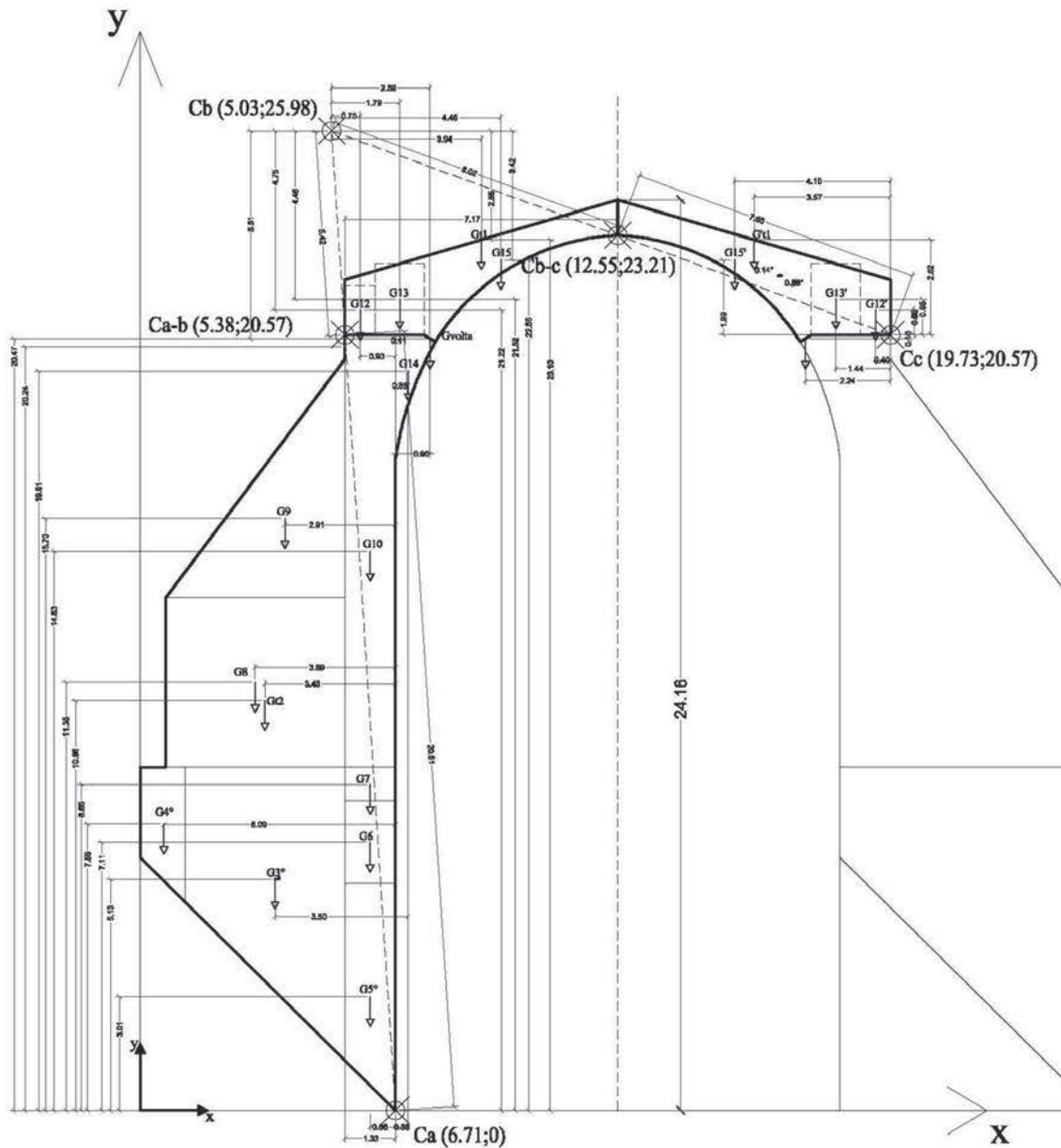
t  
e  
c  
n  
i  
c  
a  
e  
r  
i  
c  
o  
s  
t  
r  
u  
z  
i  
o  
n  
e

## ANALISI DEI MECCANISMI DI DANNO - RIEPILOGO RISULTATI -

Meccanismo	Accelerazione di collasso			Altre verifiche	
	Normativa (g)	Stato di fatto (g)	Progetto (g)		
	Rottura a taglio della facciata per azioni complanari	D.M. 14.01.2008 0,371	0,223	--	
	Ribaltamento parete navata con contrafforti	O.P.C.M. 3274 / all. 11.C 0,292	0,283	--	
	Cinematismo sezione trasversale navata	O.P.C.M. 3274 / all. 11.C 0,301	0,327	--	
	Ribaltamento transetto sx. - parete libera	O.P.C.M. 3274 / all. 11.C 0,294	0,041	0,187	
Formazione cerniera intermedia tra piede e 1° ordine tiranti			0,27		<b>VERIFICA</b>
Formazione cerniera intermedia 1° e 2° ordine tiranti			1,02		
Verifica connessione cordolo/parere muraria (per un coefficiente d'attrito $f < 0,57$ )					

Meccanismo		Accelerazione di collasso			Altre verifiche
		Normativa (g)	Stato di fatto (g)	Progetto (g)	
	Ribaltamento Facciata transetto sx. - parete solidali con muri longitudinali	O.P.C.M. 3274 / all. 11.C	0,301	0,118	0,203
	Ribaltamento transetto dx. - parete libera	O.P.C.M. 3274 / all. 11.C	0,294	0,041	0,187
<i>Formazione cerniera intermedia tra piede e 1° ordine tiranti</i>				0,35	
<i>Formazione cerniera intermedia 1° e 2° ordine tiranti</i>				0,85	
<i>Verifica connessione cordolo/parere muraria (per un coefficiente d'attrito <math>f &lt; 0,57</math>)</i>					
	Cinematismo parete longitudinale. Transetto con arco trionfale, sima -x	O.P.C.M. 3274 / all. 11.C	0,324	0,283	--
	Cinematismo parete longitudinale. Transetto con arco trionfale, sima +x	O.P.C.M. 3274 / all. 11.C	0,328	0,312	--
	Arco-Timpano Navata	D.M. 14.01.2008	0,371	0,115	0,327

Le figure di seguito riportate illustrano con maggiore dettaglio l'attivazione di probabili cinematismi tra blocchi murari (ipotizzati rigidi) della sezione trasversale della navata e della parete longitudinale del transetto. Assegnata una rotazione virtuale infinitesima al generico blocco è possibile determinare, in funzione della rotazione impressa, gli spostamenti delle diverse forze applicate nella rispettiva direzione.



Schematizzazione pannelli murari sezione trasversale navata con cappelle per l'analisi cinematica lineare

Si determina, attraverso il principio dei lavori virtuali, il moltiplicatore orizzontale dei carichi che porta all'attivazione del meccanismo locale di danno.

Conosciuto il moltiplicatore orizzontale dei carichi è possibile risalire alla corrispondente accelerazione sismica spettrale che attiva il meccanismo, da confrontare con quella stabilita dalla normativa.

