



PROVINCIA DI FERMO

SETTORE

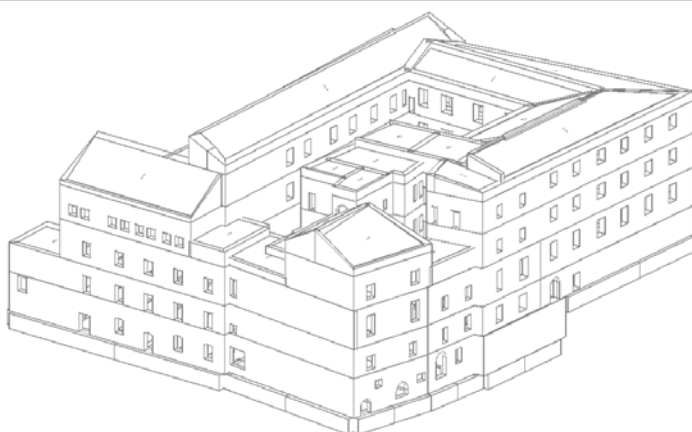
Patrimonio Edilizia Scolastica Genio Civile e Protezione Civile

STUDIO DELLA VULNERABILITA' E DEL RISCHIO SISMICO

IMMOBILE SEDE DEL

LICEO CLASSICO "ANNIBAL CARO"

Località via Permentì angolo via Giacomo Leopardi in Fermo



Revisione

1°

Tipologia tavola

Strutture

Data documento

10/05/2018

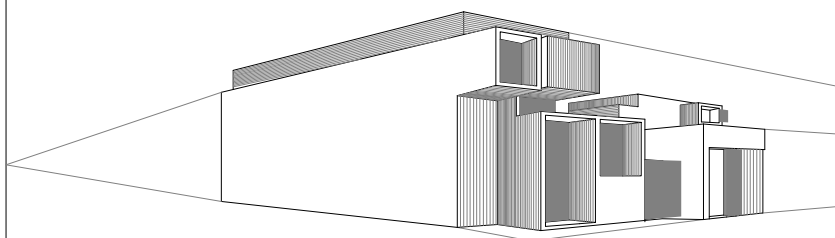
Scale utilizzate

Elaborato:

**RELAZIONE VALUTATIVA E DESCRITTIVA
DELLA VULNERABILITA' SISMICA E CALCOLO
DEL RISCHIO SISMICO**

Tav. 01

Il Resp. Procedimento
Ing. Ivano Pignoloni



Il Tecnico :

Ing. Egidio Santucci

Via P.Nenni,25 - Montappone (FM)

Tel/Fax 0734 761200 Cell. 338 3781917

P. IVA 01633150444

Timbro e firma



**Maggio
2018**

RELAZIONE GENERALE SULLA VALUTAZIONE DELLE VULNERABILITA' E DEL RISCHIO SISMICO DELL'EDIFICIO SEDE DEL LICEO CLASSICO "ANNIBAL CARO"

1. Premessa

L'Ente Provincia di Fermo, proprietaria dell'edificio sede del Liceo Classico "Annibal Caro", a seguito degli eventi sismici iniziati il 24 agosto 2016, ha attuato il piano strategico degli interventi per la riparazione dei danni lievi e della messa in sicurezza delle aree dell'edificio storico maggiormente danneggiate dal sisma. Ha successivamente dato corso ad uno studio coordinato per indagare sulle reali condizioni strutturali dello stabile, in modo da potere valutare le specifiche vulnerabilità e quindi determinare i più efficaci interventi volti a diminuire, per quanto possibile, il rischio sismico.

La presente relazione è la sintesi di un lavoro lungo e complesso, frutto di una campagna d'indagine laboriosa che ha portato alla più fedele rappresentazione del modello matematico utilizzato per condurre le verifiche strutturali richieste dalle Norme Tecniche delle Costruzioni (di seguito NTC).

Data la tipologia dell'edificio, la sua storicità, la complessità della sua articolazione sia in pianta che in elevazione, le diverse epoche di costruzione, il contesto nel quale è collocato e l'impossibilità di poter indagare in ogni singolo elemento costitutivo, è evidente che il modello di calcolo predisposto contiene in sé alcune semplificazioni, spesso restrittive, necessarie alla discretizzazione della struttura. Per tener conto delle incertezze della rappresentazione matematica, come stabilito dalla norma, il modello utilizzato adotta un fattore di confidenza (attenuatore delle incertezze del modello), figlio dell'adeguato livello di conoscenza del fabbricato.

2. Quadro normativo di riferimento

Il complesso approccio alla vulnerabilità e al rischio sismico dei fabbricati esistenti definiti "strategici", fra essi le scuole di ogni ordine e grado, trova la prima applicazione nell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20.03.2003. La Regione Marche, d'intesa con il Dipartimento delle Protezione Civile, ha definito la tipologia degli edifici da sottoporre a verifica e ha fornito le prime indicazioni per le valutazioni tecniche da eseguire nello studio degli interventi volti a ridurre le vulnerabilità sismiche nei fabbricati "strategici". Metodi più evoluti nello studio delle vulnerabilità dei fabbricati esistenti vengono definiti dalle Norme Tecniche delle Costruzioni nel 2008 e dalla Circolare Applicativa del 2009, ora integrate nelle recentissime NTC 2018. Il nuovo quadro normativo ha definito il corretto approccio alla valutazione della sicurezza degli edifici esistente precisando sia le metodologie da impiegare nelle analisi, sia i gradi di accuratezza da raggiungere, oltre a stabilire i livelli di prestazione per le diverse categorie d'edificio da sottoporre a valutazione. Sono state regolamentate le indagini conoscitive necessarie, stabiliti gli adeguati livelli di conoscenza degli elementi strutturali costitutivi dei fabbricati e normalizzati i metodi di verifica degli edifici esistenti.

Le NTC 2018 hanno compiutamente definito la valutazione della sicurezza degli edifici esistenti come “un procedimento quantitativo, volto a determinare l’entità delle azioni che la struttura è in grado di sostenere con il livello di sicurezza minimo richiesto dalla normativa”.

La nuova norma introduce concetti innovativi e quantitativi più precisi per interventi di miglioramento e adeguamento sismico degli edifici scolastici esistenti. In primo luogo si precisano le caratteristiche degli interventi da effettuare sui fabbricati esistenti “strategici” di classe III ad uso scolastico e di classe IV, fissando l’obbligo di valutare l’entità dell’azione sismica che la struttura è in grado di sopportare per confrontarla con l’azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto dello stesso fabbricato di nuova costruzione (struttura adeguata alla norma sismica quando il rapporto tra capacità e domanda è $\zeta_E \geq 1,00$). Nella distinzione degli interventi ordinari su edifici scolastici sussistono i seguenti obblighi:

- Miglioramento Sismico - **A meno di specifiche situazioni relative ai beni culturali, per interventi di miglioramento sismico dei fabbricati esistenti di classe III ad uso scolastico o di classe IV è sempre richiesto che il rapporto tra capacità e domanda sismica sia $\zeta_E \geq 0,60$** (prescrizione disposta nel paragrafo 8.4.3. delle NTC 2018);
- Adeguamento Sismico - **Per interventi che modificano la classe d’uso e conducono la costruzione in classe III ad uso scolastico o di classe IV, è tollerato l’adeguamento sismico con rapporto $\zeta_E \geq 0,80$** (deroga disposta al punto “e” del paragrafo 8.4.3. delle NTC 2018).

Per valutare l’efficacia degli interventi di miglioramento sismico che sono stati effettuati nel tempo sulla struttura del plesso scolastico “Annibal Caro” e/o se sono necessari ulteriori interventi ad attenuazione di specifiche vulnerabilità sismiche, è necessario valutare l’azione sismica massima sopportabile dalla struttura esistente e confrontarla con l’azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova scuola della stessa natura.

Diverso è il quadro normativo formatosi in conseguenza della crisi sismica iniziata il 24 agosto 2016, di carattere straordinario e spesso derogatorio della norma vigente, principalmente volto a stabilire i criteri di gestione delle risorse finanziarie necessarie alla ricostruzione delle zone colpite dal sisma. A riguardo dell’edilizia scolastica i Decreti Ministeriali stanziavano finanziamenti per la costruzione di nuovi edifici scolastici definitivi, in sostituzione delle scuole che non possono essere oggetto di adeguamento sismico secondo la disciplina delle Norme Tecniche per le Costruzioni; incentivava la riparazione, con adeguamento sismico degli edifici scolastici che hanno avuto un esito di agibilità “E”; sovvenzionavano i moduli scolastici provvisori per quelle scuole che verranno riparate con adeguamento sismico. È necessario precisare, quindi, che **per tutti gli interventi a carattere straordinario, volti a superare la crisi sismica che ha danneggiato e/o reso inagibili gli edifici “strategici” di classe III ad uso scolastico o di classe IV, è richiesto l’adeguamento sismico della struttura** (rapporto d’adeguatezza sismica $\zeta_E \geq 1,00$). In altri termini è possibile accedere ai fondi straordinari relativi alla crisi sismica solo per effettuare tutti gli interventi necessari a garantire che la sollecitazione sismica massima sopportabile della struttura esistente sia uguale

e/o superiore all'azione sismica che si utilizzerebbe nel progetto di un nuovo edificio scolastico della stessa tipologia.

3. Cenni storici e composizione geometrica del plesso scolastico.

Il liceo classico "Annibal Caro" ha la sua sede in un splendido complesso edificato in varie epoche nel cuore del centro storico della città di Fermo. Palazzo signorile che nasce in continuità alla chiesa di San Martino, oggi trasformata in Auditorium cittadino di proprietà del Comune di Fermo. Edificato nella sua maggiore consistenza presumibilmente a fine del 1600, si addossa e si interseca con la monumentale struttura della chiesa di San Martino costituendo un agglomerato edilizio di straordinaria bellezza, dalle geometrie fortemente irregolari e marcata eterogeneità dei materiali costitutivi. Gli oltre 5.000 metri quadri del liceo classico si articolano su due livelli sotto-strada e tre livelli fuori terra e compenetrano, a livello del piano secondo, la navata laterale dell'Auditorium San Martino. Il Liceo si estende principalmente lungo via Perpendi ed ha l'ingresso a piano terra in via Giacomo Leopardi come l'Auditorium che manifesta tutta la sua maestosità e altitudine lungo via Mameli. Nell'agglomerato edilizio è facilmente riconoscibile il corpo di fabbrica di originaria costituzione e gli elementi aggiunti, architettonicamente ben integrati, ma strutturalmente ben distinguibili per la loro diversa costituzione, forma e consistenza.

4. Rilievo geometrico, materico e analisi del quadro fessurativo.

L'edificio che ospita il Liceo Classico sicuramente più volte rimaneggiato nelle varie epoche è stato oggetto di un importante intervento di consolidamento e restauro conservativo conseguente la crisi sismica del 1997. I lavori eseguiti a partire dall'anno 2002 hanno interessato principalmente i piani fuori terra del fabbricato e rafforzato i presidi sismici ("catene") già presenti nello stabile. Per avere un adeguato livello di conoscenza del fabbricato si è reperita tutta la documentazione progettuale messa a disposizione dalla Provincia di Fermo e quella depositata al Comune di Fermo. Successivamente si sono acquisite una serie di informazioni che hanno riguardato:

- La verifica geometrica in loco delle reali consistenze geometriche delle strutture con particolare attenzione alle dimensioni degli elementi sismo-resistenti;
- Il rilievo del quadro fessurativo attestato da cospicua documentazione fotografica;
- Il rilievo dei presidi sismici visibili con la loro esatta collocazione spaziale;
- Lo studio della documentazione progettuale acquisita per l'individuazione delle caratteristiche note degli interventi;
- La caratterizzazione ragionata e rappresentativa dei materiali di costruzione attraverso una campagna d'indagine sulle murature che costituiscono i diversi corpi di fabbrica.
- La caratterizzazione del terreno di fondazione mediante analisi dei sondaggi allegati alle relazioni geologiche esistenti, integrate mediante prove geofisiche eseguite dal Geol. Costantino Berardini

della Provincia di Fermo, necessarie a determinare tutti i dati occorrenti alla valutazione dell'azione sismica di progetto.

Tutta la documentazione dei rilievi, delle prove sui materiali delle indagini geofisiche e tutti gli elaborati di verifica che per dimensione non possono essere inseriti nella presente relazione riassuntiva, vengono allegati in fascicoli separati e costituiscono parte integrante ed essenziale delle argomentazioni trattate nel presente documento. È necessario precisare che non tutte le parti della struttura sono accessibili (sotterranei, sottotetto e tetto) e le loro consistenze sono state determinate sulla base degli elaborati progettuali dei precedenti interventi di restauro conservativo. È stato fissato un livello di conoscenza LC2 (medio tra i tre possibili), conforme a quanto richiesto dalla norma e quindi un fattore di confidenza pari a 1,2 che tiene conto delle incertezze della struttura.

In conseguenza di un evento tellurico significativo, come quello iniziato il 26 agosto del 2016, il quadro fessurativo manifestato restituisce una serie di informazioni utili per l'analisi del comportamento sismico del fabbricato oggetto di studio. Le manifestazioni delle lesioni sulle strutture murarie rappresentano sempre movimenti relativi eccessivi degli elementi strutturali sottoposti ad azioni locali maggiori rispetto alle loro capacità di resistenza in condizioni d'esercizio.

Sottoposta all'azione sismica la scuola "Annibal Caro" ha manifestato due ordini significativi di danno: uno lieve, che ha interessato il concio di chiave delle volte a botte del corridoio a piano primo e secondo dell'ala del fabbricato che si estende lungo via Giacomo Leopardi; l'altro grave, che interessa l'intera aula di fisica e l'adiacente scala di accesso a ridosso dell'abside dell'ex chiesa di San Martino. I danni lievi, alcuni ancora evidenti e riscontrabili negli elaborati grafici del rilievo, sono stati parzialmente riparati dall'ufficio patrimonio della Provincia di Fermo, mentre per i danni gravi in prossimità dell'auditorium è stato approntato un intervento di puntellamento e messa in sicurezza provvisoria in attesa di conoscere le principali cause che l'hanno generato. Le intense accelerazioni sismiche hanno causato ingenti danni anche all'Auditorium San Martino determinandone l'inagibilità fin dai primi eventi tellurici.

5. Valutazione critica del danno e approccio alle verifiche sismiche.

La continuità strutturale della scuola "Annibal Caro" con l'Auditorium San Martino determina interazioni ed eterogeneità che hanno arrecato il massimo danno proprio in corrispondenza dei punti di contatto dei distinti corpi di fabbrica. Per la messa in sicurezza dell'Auditorium San Martino sono stati necessari lavori di pronto intervento che hanno interessato sia la vela campanaria, che minacciava rovina sull'ala della parte interna del Liceo Classico (interdetta per rischio esterno), sia l'abside mediante la tirantatura dei livelli sommitali per bloccare le rotazioni rigide differenziali dei corpi monumentali. Con ogni probabilità gli spostamenti per rotazione sono stati causa del grave danneggiamento delle volte dell'aula di fisica e della scala di accesso adiacente. Valutati i comportamenti e le diverse composizioni dei corpi di fabbrica riguardanti la sede del Liceo Classico e quella di San Martino, si ritiene che in corrispondenza delle loro

superfici di contatto si sia formato un giunto naturale con gravi fessurazioni dovute al superamento delle capacità resistenti delle più deboli strutture della volta e della scala. Del resto è impensabile che le strutture che compongono l'aula di fisica potessero contrastare le accelerazioni delle maestose masse della chiesa. Il sistema di tirantatura della chiesa di San Martino ha interessato l'intero perimetro del monumento ed è stato studiato per contenere gli spostamenti relativi dei diversi corpi murari che lo costituiscono. L'intervento ha limitato le azioni di interazione delle diverse strutture rendendo congrui gli spostamenti in prossimità delle superfici di contatto e potendo quindi modellare la struttura nelle sue reali condizioni.

Costruito il modello matematico con codici ad elementi finiti e caratterizzate le grandezze fisiche dei componenti costitutivi secondo le risultanze delle indagini condotte, sono state effettuate le verifiche sismiche richieste secondo i metodi d'analisi locale e globale previsti dalle Norme Tecniche delle Costruzioni.

In prima analisi sono stati individuati i meccanismi locali più rappresentativi e mediante lo studio delle catene cinematiche è stata analizzata l'adeguatezza dei presidi sismici presenti e valutati gli eventuali rafforzamenti necessari.

Le richieste di resistenza della struttura agli sforzi di pressoflessione e a taglio nel piano del pannello murario, sono state condotte con una analisi statica non lineare (Pushover) che consente di valutare la capacità degli spostamenti della struttura in relazione alla richiesta normata.

Le verifiche a pressoflessione ortogonale fuori dal piano del pannello murario sono state eseguite con una analisi sismica Dinamica Modale.

6. Cinematismi.

Data la presenza delle spinte delle volte sia nell'ala parallela a via Perpentì sia nell'ala parallela a via Giacomo Leopardi, si è voluto indagare sulla capacità dei tiranti esistenti a fronteggiare non solo le azioni statiche derivanti dalle spinte delle volte ma anche il loro grado di adeguatezza in condizioni sismiche. Sono stati individuati 10 possibili meccanismi di collasso che interessano le due vie pubbliche, per ogni cinematismo, dalle equazioni di equilibrio in condizioni sismiche, si sono calcolate le forze equilibranti di progetto rispetto a quella richiesta per l'adeguamento normativo. Il dettaglio numerico è possibile ricavarlo dall'elaborato del tabulato di calcolo, mentre di seguito vengono riportate le sintesi grafiche, utili ad individuare quei meccanismi che necessitano di rafforzamento per raggiungere l'adeguatezza alla norma vigente.

01. Cinematismo via Perpendi parte alta

Ribaltamento semplice

$\alpha_0 = 0.235$

■ SLD

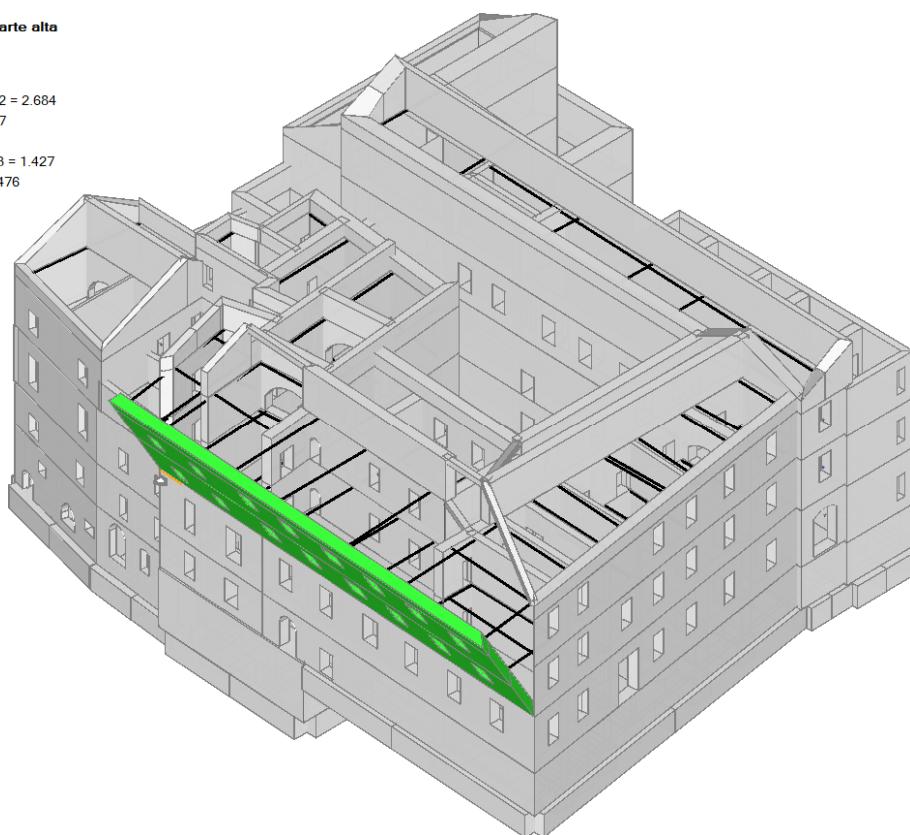
$PGA_{CLD} / PGA_{DLD} = 0.248 / 0.092 = 2.684$

$TR_{CLD} / TR_{DLD} = 671 / 75 = 8.947$

■ SLV

$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.361 / 0.253 = 1.427$

$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 2475 / 712 = 3.476$



Cinematismo 1: Presidi sismici adeguati

02. Cinematismo via Perpendi intera facciata

Ribaltamento semplice

$\alpha_0 = 0.133$

■ SLD

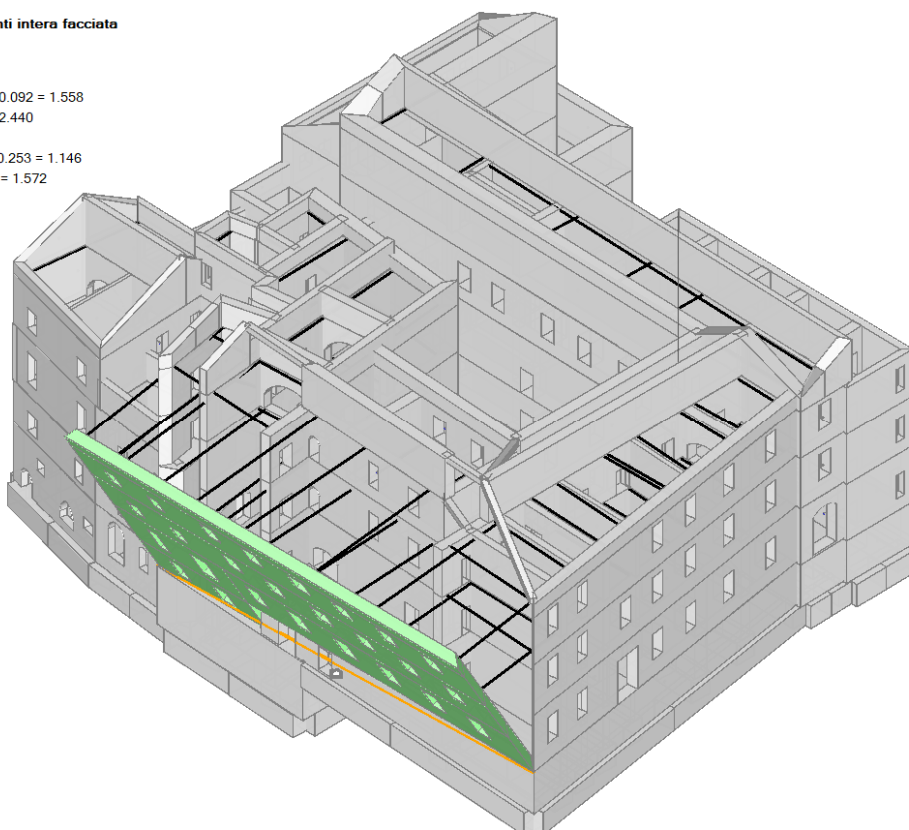
$PGA_{CLD} / PGA_{DLD} = 0.144 / 0.092 = 1.558$

$TR_{CLD} / TR_{DLD} = 183 / 75 = 2.440$

■ SLV

$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.290 / 0.253 = 1.146$

$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 1119 / 712 = 1.572$



Cinematismo 2: Presidi sismici adeguati

03. Cinematismo Via Leopardi vincolo ai bordi

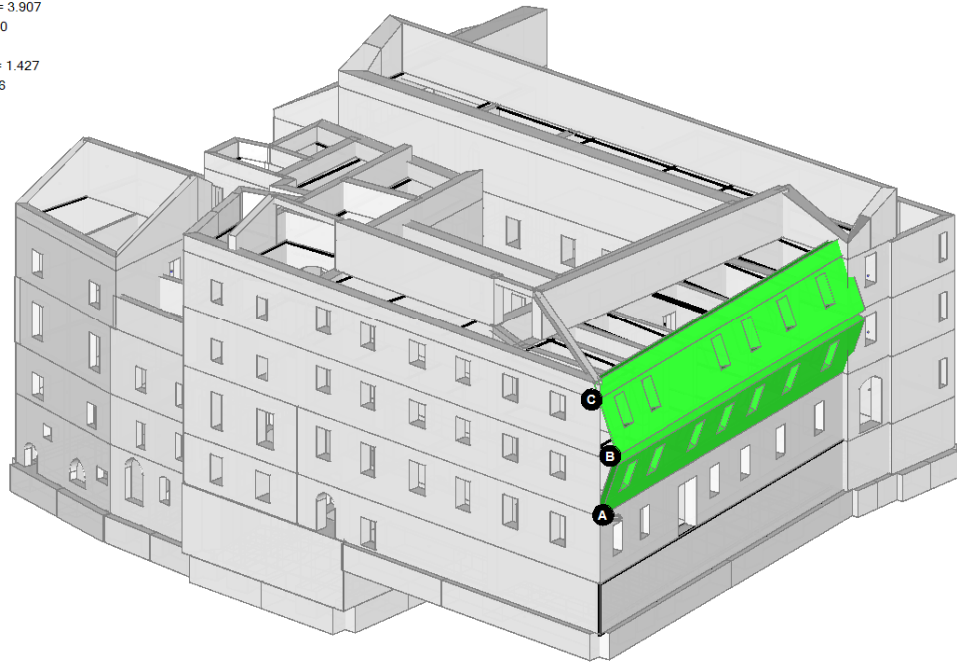
Flessione di parete vincolata ai bordi
 $\alpha_0 = 0.519$

■ SLD

$$PGA_{CLD} / PGA_{DLD} = 0.361 / 0.092 = 3.907$$
$$TR_{CLD} / TR_{DLD} = 2475 / 75 = 33.000$$

■ SLV

$$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.361 / 0.253 = 1.427$$
$$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 2475 / 712 = 3.476$$



Cinematismo 3: Presidi sismici adeguati

04. Cinematismo Via Leopardi vincolo ai bordi tutta altezza

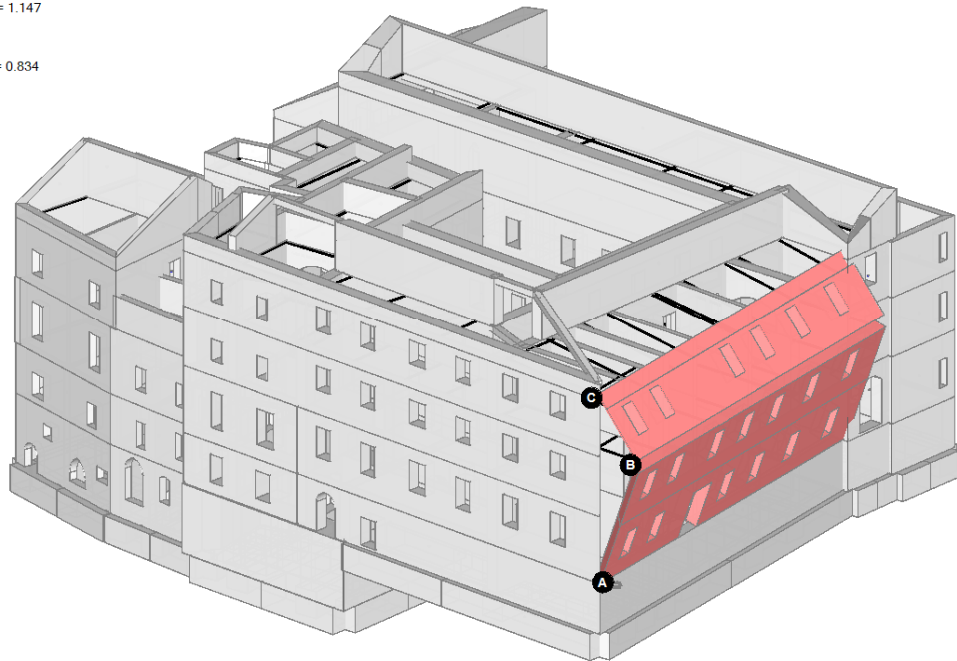
Flessione di parete vincolata ai bordi
 $\alpha_0 = 0.102$

■ SLD

$$PGA_{CLD} / PGA_{DLD} = 0.106 / 0.092 = 1.147$$
$$TR_{CLD} / TR_{DLD} = 100 / 75 = 1.333$$

■ SLV

$$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.211 / 0.253 = 0.834$$
$$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 437 / 712 = 0.614$$



Cinematismo 4: Presidi sismici NON adeguati

05. Cinematismo Via Leopardi intera facciata 3T

Ribaltamento semplice

$\alpha_0 = 0.080$

■ SLD

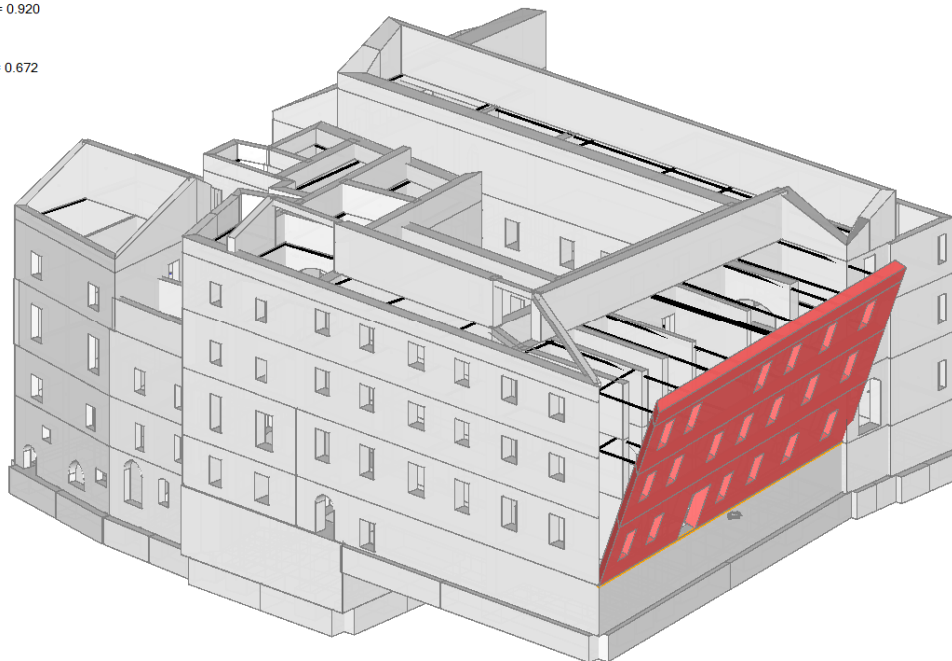
$PGA_{CLD} / PGA_{DLD} = 0.085 / 0.092 = 0.920$

$TR_{CLD} / TR_{DLD} = 61 / 75 = 0.813$

■ SLV

$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.170 / 0.253 = 0.672$

$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 263 / 712 = 0.369$



Cinematismo 5: Presidi sismici NON adeguati

06. Cinematismo via Perpendi vincolo bordi alto

Flessione di parete vincolata ai bordi

$\alpha_0 = 0.577$

■ SLD

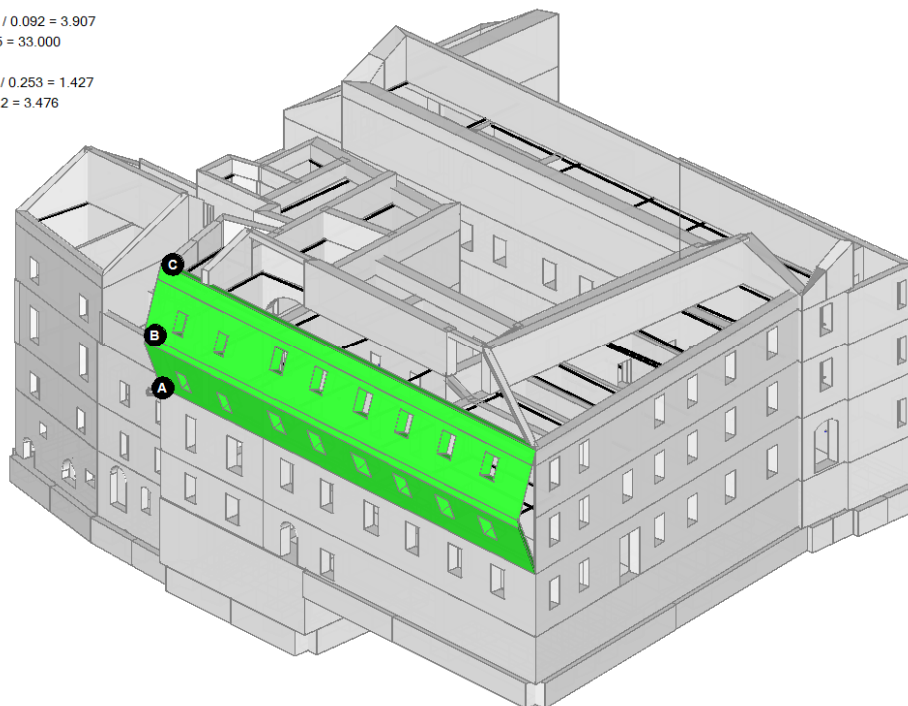
$PGA_{CLD} / PGA_{DLD} = 0.361 / 0.092 = 3.907$

$TR_{CLD} / TR_{DLD} = 2475 / 75 = 33.000$

■ SLV

$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.361 / 0.253 = 1.427$

$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 2475 / 712 = 3.476$



Cinematismo 6: Presidi sismici adeguati

07. Cinematismo via Perpentì basso 1

Ribaltamento semplice

$\alpha_0 = 0.143$

■ SLD

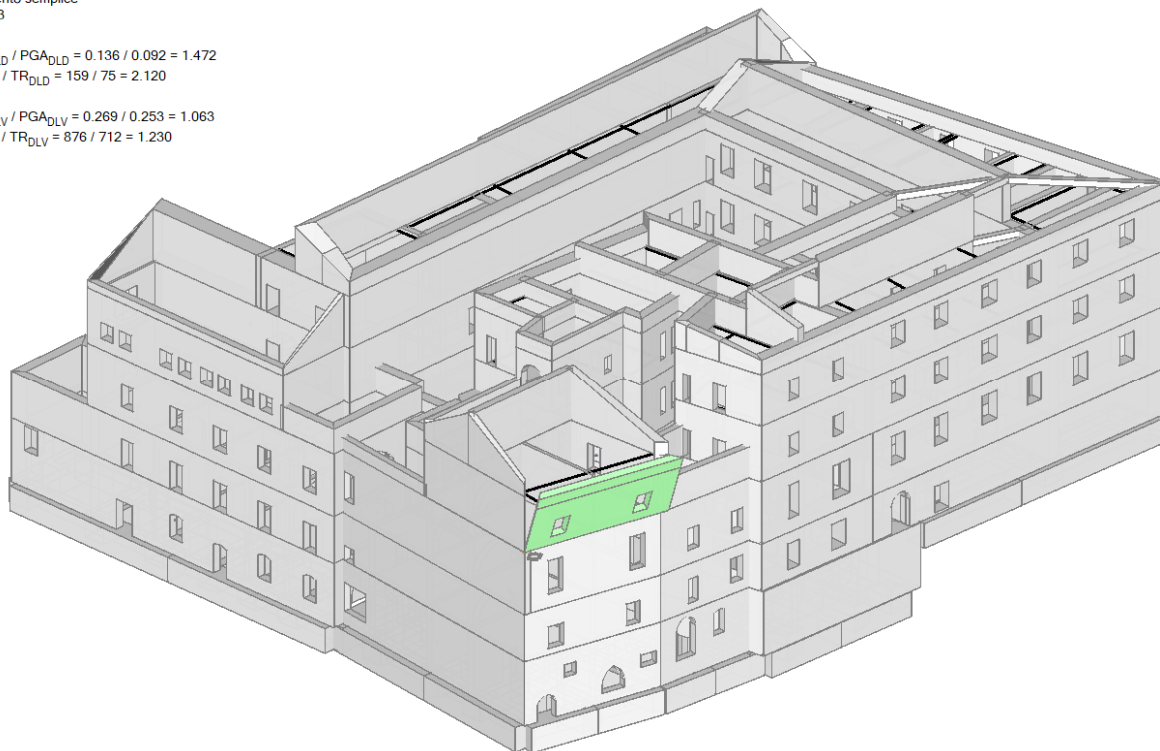
$PGA_{CLD} / PGA_{DLD} = 0.136 / 0.092 = 1.472$

$TR_{CLD} / TR_{DLD} = 159 / 75 = 2.120$

■ SLV

$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.269 / 0.253 = 1.063$

$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 876 / 712 = 1.230$



Cinematismo 7: Presidi sismici adeguati

08. Cinematismo via Perpentì basso 2

Ribaltamento semplice

$\alpha_0 = 0.095$

■ SLD

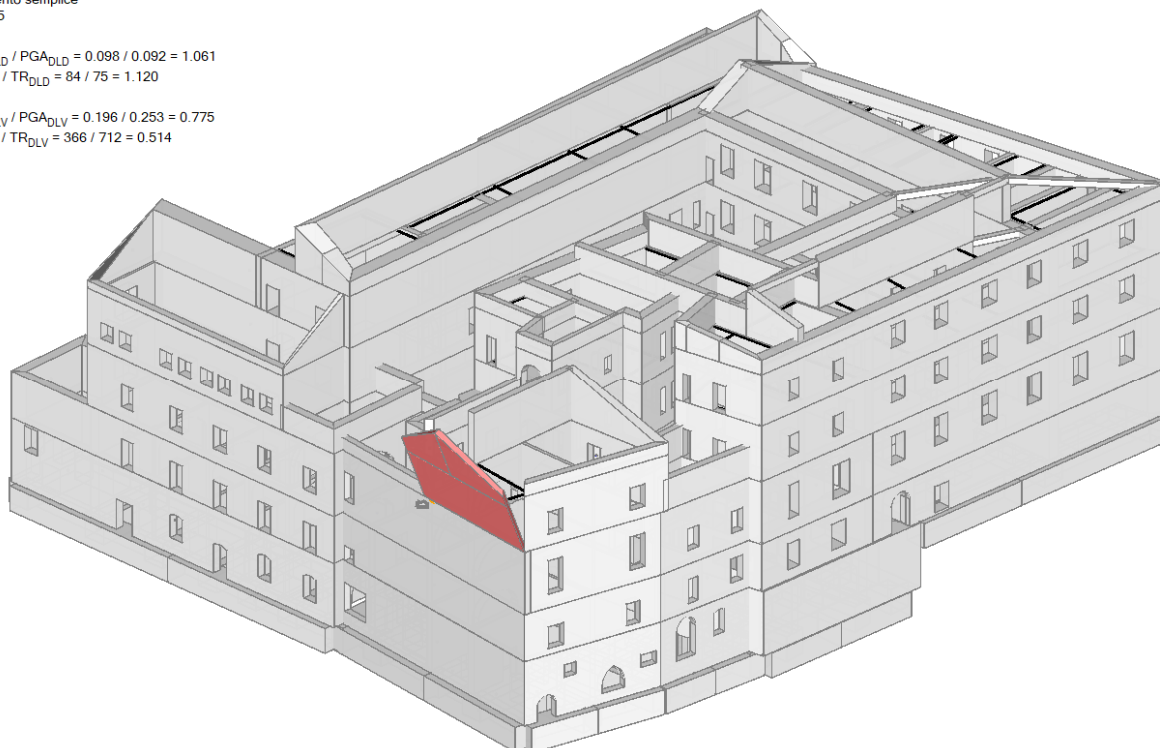
$PGA_{CLD} / PGA_{DLD} = 0.098 / 0.092 = 1.061$

$TR_{CLD} / TR_{DLD} = 84 / 75 = 1.120$

■ SLV

$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.196 / 0.253 = 0.775$

$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 366 / 712 = 0.514$



Cinematismo 8: Presidi sismici NON adeguati

09. Cinematismo via Perpentì basso 3

Ribaltamento semplice

$\alpha_0 = 0.382$

■ SLD

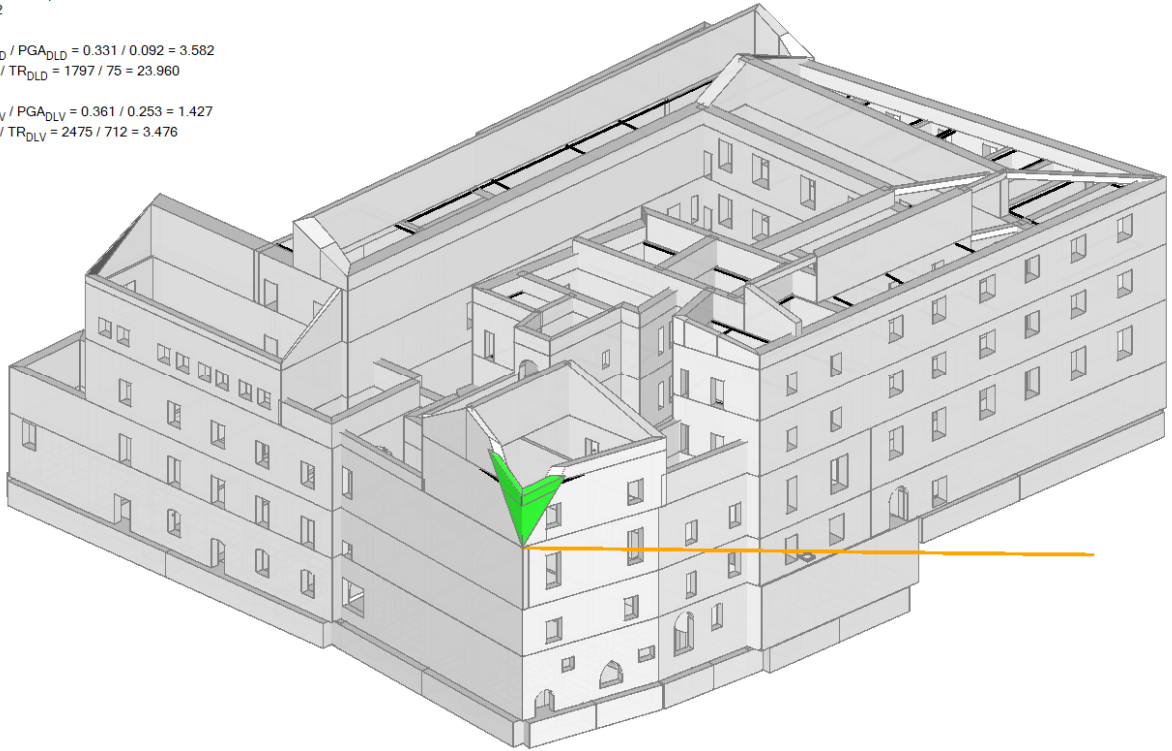
$$PGA_{CLD} / PGA_{DLD} = 0.331 / 0.092 = 3.582$$

$$TR_{CLD} / TR_{DLD} = 1797 / 75 = 23.960$$

■ SLV

$$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.361 / 0.253 = 1.427$$

$$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 2475 / 712 = 3.476$$



Cinematismo 9: Meccanismo con bassa probabilità di innesco

10. Cinematismo via Perpentì basso 4

Flessione di parete vincolata ai bordi

$\alpha_0 = 0.223$

■ SLD

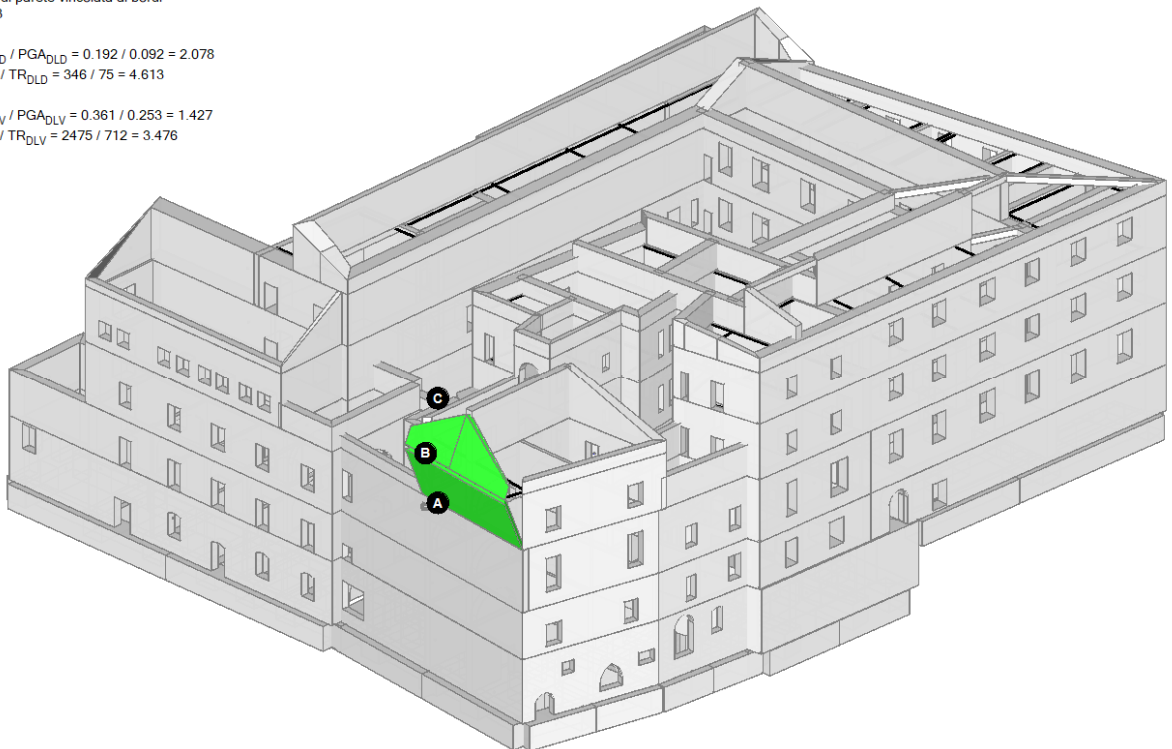
$$PGA_{CLD} / PGA_{DLD} = 0.192 / 0.092 = 2.078$$

$$TR_{CLD} / TR_{DLD} = 346 / 75 = 4.613$$

■ SLV

$$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.361 / 0.253 = 1.427$$

$$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 2475 / 712 = 3.476$$



Cinematismo 10: Meccanismo con bassa probabilità di innesco

Dalle risultanze delle analisi condotte si evidenzia che i presidi sismici posti a protezione del ribaltamento della facciata su via Perpendi sono adeguati, mentre i presidi della facciata che proteggono via Giacomo Leopardi necessitano di un rafforzamento per raggiungere l'adeguamento sismico. Guardando con attenzione le piante del rilievo, al piano primo e secondo, si osserva che in prossimità della scala principale mancano alcuni tiranti. In aggiunta i due tiranti che corrono nella navata di San Martino sono stati posizionati nell'intervento di messa in sicurezza eseguito dal Comune di Fermo nell'anno 2017. Alla luce delle considerazioni sopra riportate, sono giustificati i danni lievi riportati dalle volte dei corridoi paralleli a via Giacomo Leopardi che ha costretto la Provincia ad intervenire subito dopo il sisma del 24 agosto 2016. Più in dettaglio vi è stata la probabile attivazione del cinematismo 5 ipotizzato in via Giacomo Leopardi con superamento dello Stato Limite di Danno. Le forze di reazione sismica delle catene, allora prive anche dell'apporto dei tiranti inseriti solo nell'intervento di messa in sicurezza dell'Auditorium, hanno consentito una deformazione limite per la struttura con manifestazione del danno nel concio di chiave delle volte del corridoio a piano primo e secondo.

L'indicatore del rischio sismico calcolato, sia allo stato limite di danno, sia allo stato limite di salvaguardia della vita è dato dall'indice più basso dei relativi involuppi sintetizzati come segue:

SINTESI RISULTATI ANALISI CINEMATICA LINEARE

Livello di sicurezza inferiore all'Adeguamento sismico

Risultati dei cinematismi analizzati:

n.	α_0	PGA,CLD	TR,CLD	(TR,CLD	PGA,CLV	TR,CLV	(TR,CLV
		/PGA,DLD	/TR,DLD	/TR,DLD)^0.41	/PGA,DLV	/TR,DLV	/TR,DLV)^0.41

1	0.235	2.684	8.947	2.456	1.427	3.476	1.667
2	0.133	1.558	2.440	1.442	1.146	1.572	1.204
3	0.519	3.907	33.000	4.194	1.427	3.476	1.667
4	0.102	1.147	1.333	1.125	0.834	0.614	0.819
5	0.080	0.920	0.813	0.919	0.672	0.369	0.664
6	0.577	3.907	33.000	4.194	1.427	3.476	1.667
7	0.143	1.472	2.120	1.361	1.063	1.230	1.089
8	0.095	1.061	1.120	1.048	0.775	0.514	0.761
9	0.382	3.582	23.960	3.678	1.427	3.476	1.667
10	0.223	2.078	4.613	1.872	1.427	3.476	1.667

n. = numero consecutivo del cinematismo

α_0 = moltiplicatore di collasso

PGA,CLD / PGA,DLD = I.R.S.PGA = indicatore di Rischio Sismico in termini di PGA per SLD

$TR,CLD / TR,DLD = I.R.S. TR =$ indicatore di Rischio Sismico in termini di periodo di ritorno TR per SLD
 $(TR,CLD/TR,DLD)^{0.41} =$ indicatore di Rischio Sismico in termini di TR per SLD, su scala comparata a PGA
 $PGA,CLV / PGA,DLV = I.R.S.PGA =$ indicatore di Rischio Sismico in termini di PGA per SLV
 $TR,CLV / TR,DLV = I.R.S. TR =$ indicatore di Rischio Sismico in termini di periodo di ritorno TR per SLV
 $(TR,CLV/TR,DLV)^{0.41} =$ indicatore di Rischio Sismico in termini di TR per SLV, su scala comparata a PGA

SINTESI DELLE VERIFICHE IN ANALISI CINEMATICA DELLO STATO ATTUALE

Stato Limite di Danno (SLD):		
Indicatore del rischio sismico	Cinematismo	5
I.R.S. PGA	0.920	
I.R.S. TR	0.813	
I.R.S. TR comparato PGA	0.919	

Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV):		
Indicatore del rischio sismico	Cinematismo	5
I.R.S. PGA	0.672	
I.R.S. TR	0.369	
I.R.S. TR comparato PGA	0.644	

7. Verifiche degli sforzi a Pressoflessione e a Taglio nel piano della muratura. (Analisi Pushover)

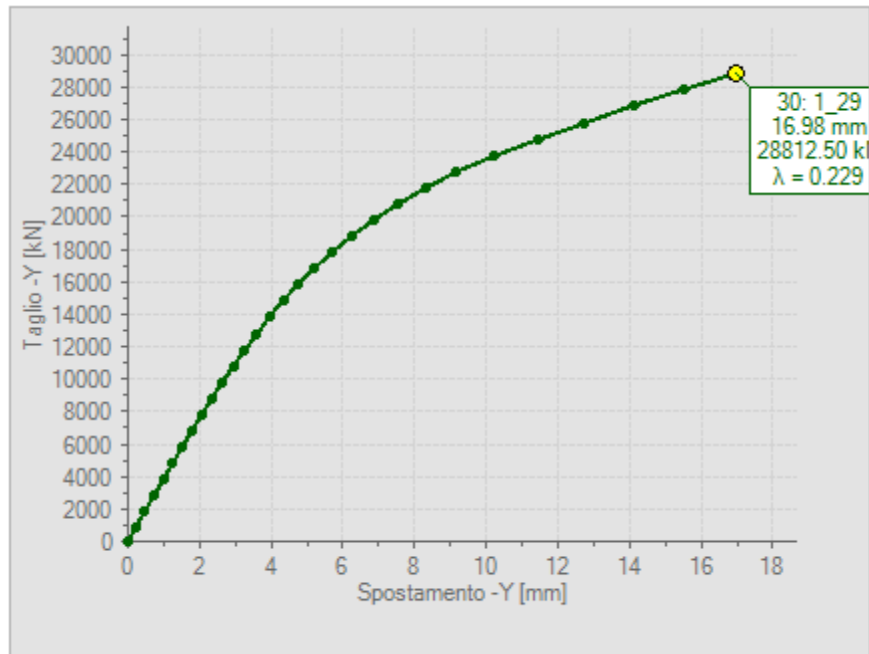
Per la valutazione dello stato di massimo sforzo agente sul piano del pannello murario è stata condotta una verifica sismica in analisi statica non lineare (Pushover) finalizzata a cogliere il comportamento “globale” della struttura. Per la valutazione delle resistenze a Presso-Flessione Ortogonale fuori dal piano delle strutture murarie si rimanda al successivo paragrafo e quindi all’analisi dinamica modale condotta.

Il metodo d’analisi Pushover, consigliato dalle Norme Tecniche delle Costruzioni per edifici esistenti complessi come quello trattato, schematizza la struttura in un oscillatore monodimensionale bilineare (elastoplastico) equivalente e lo utilizza per il calcolo della domanda di spostamenti in condizioni sismiche. La richiesta di spostamenti viene poi confrontata con la capacità della struttura di far fronte a tale domanda in base alle proprie rigidità e alle duttilità del sistema. La deformazione ultima nel piano del pannello murario rappresenta anche la resistenza finale opposta alla sollecitazione sismica data la conoscenza delle rigidità e dei legami costitutivi dei materiali. L’elaborazione delle curve di capacità della struttura rappresentano il parametro di confronto con la domanda e quindi definiscono l’indicatore del rischio sismico del fabbricato sia allo stato limite ultimo, sia allo stato limite d’esercizio.

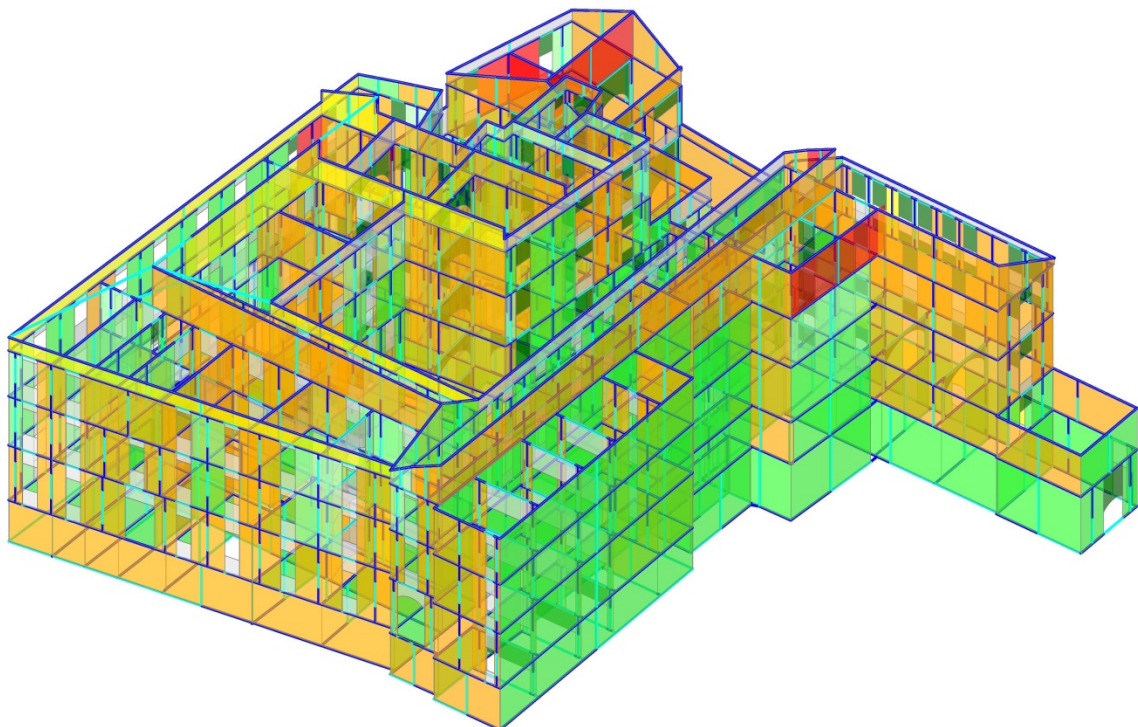
La definizione delle grandezze fisiche incidenti sulla rigidità dei setti murari e le duttilità del modello sono state valutate dal rilievo materico effettuato e sulla scorta delle prove eseguite, ponderate dai criteri restrittivi posti dalla norma per tener conto della rappresentatività della muratura nei fabbricati esistenti. Per il dettaglio dei valori di resistenza delle murature si fa riferimento ai certificati di prova allegati e i

relativi parametri fisici impiegati nel calcolo sono descritti dettagliatamente nel fascicolo dell'analisi sismica Pushover.

Dall'elaborazione dell'analisi statica non lineare, i parametri ultimi di collasso per il fabbricato studiato sono rappresentati nel seguente grafico:



In tale condizione ultima di collasso il fabbricato ha una rottura fragile e progressiva dei setti, che conduce a deformazioni sempre più estese fuori dal campo elastico. Di seguito si riporta la modellazione nel punto di collasso con rappresentati in verde i setti ancora con risorse di deformazione elastica, in giallo i setti che hanno attivato le risorse plastiche e prossimi al collasso, in rosso i setti che subiscono il primo collasso.



A_x-Y: SLV: |cap|=16.98 < |dom|=28.59 ($\eta^* = 2.572 < 3$). SLD: |cap|=15.52 > |dom|=8.98 (Sistema M-GDL).

Taglio globale alla base (kN)

Spostamento (mm)

M-GDL (curva Y) 1-GDL Bilineare

Left Graph: Force-Displacement

Y-axis: Taglio globale alla base (kN) (Global shear at base in kN)
X-axis: Spostamento (mm) (Displacement in mm)

Model: Bilineare (Bilinear)
Curva Y: M-GDL (curva Y) (M-GDL curve Y)
1-GDL: 1-GDL

Key points and values:

- F_{max} : -28812.5 kN
- $F_{max} \text{ 1-GDL}$: -24812.5 kN
- $F_{max} \text{ 1-GDL}$ (10%): -22327.83 kN
- $F_{max} \text{ 1-GDL}$ (10%): -21014.67 kN
- $F_{max} \text{ 1-GDL}$ (10%): -15629.48 kN
- γ (Ductility ratio): 2.572

Right Graph: Spectral Acceleration vs Displacement

Y-axis: S_a (g) (Spectral acceleration in g)
X-axis: S_d (mm) (Displacement in mm)

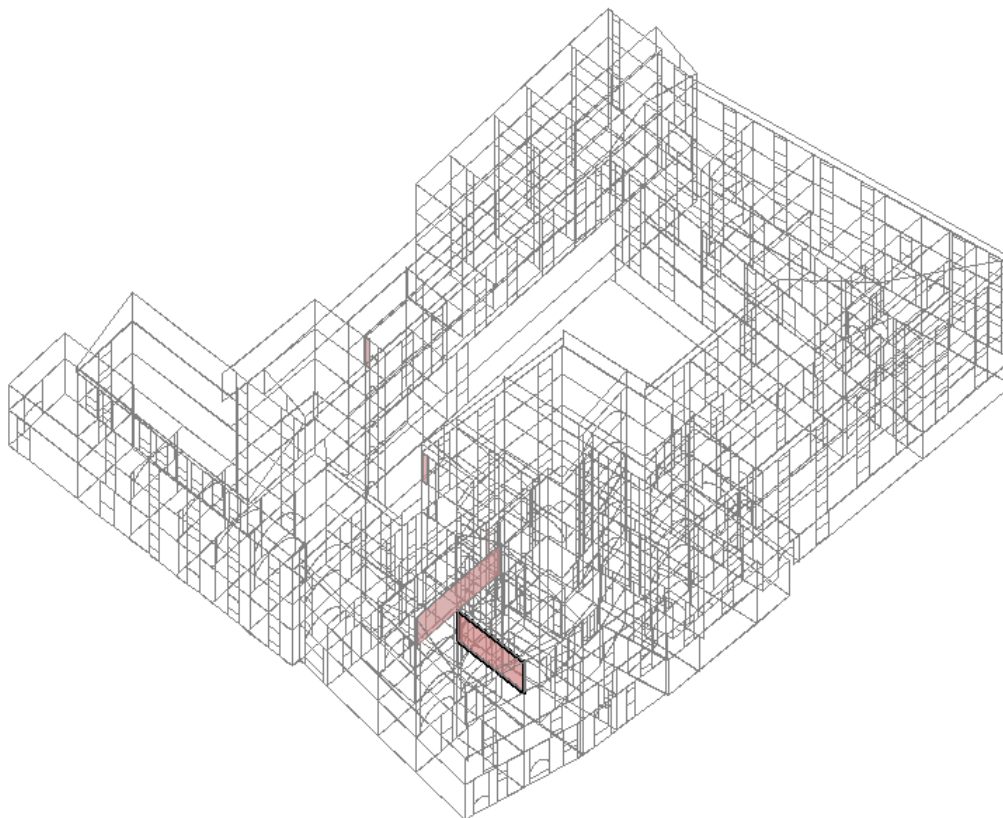
Model: Bilineare (Bilinear)
Capacità: Capacità (Capacity)
Domanda elastica: Domanda elastica (Elastic demand)
Domanda anelastica: Domanda anelastica (Inelastic demand)

Key points and values:

- $T^* < T_C$ (Peak period less than corner period)
- $\mu = 1.0$ (Damping ratio)
- $\mu = 3.0$ (Damping ratio)

8. Verifiche di Resistenza fuori dal piano del pannello (Presso-Flessione Ortogonale)

Le resistenze alle sollecitazioni sismiche per le azioni fuori dal piano sono state valutate conducendo l'analisi sismica dinamica modale. Dato il rilevante spessore delle strutture murarie non si hanno grandi difetti di resistenza a presso-flessione ortogonale dei pannelli murari ad eccezione di alcuni limitati setti poco significativi che sono comunque prossimi all'adeguamento sismico.



Dai fascicoli di calcolo che riguarda sia la verifica sismica in analisi statica non lineare (Pushover) per le azioni nel piano della muratura, sia la verifica sismica in analisi sismica dinamica modale per le azioni fuori dal piano, sia i cinematismi dei meccanismi locali è possibile estrapolare il seguente quadro riassuntivo degli indicatori di rischio sismico.

9. Sintesi degli Indicatori di rischio sismico dello STATO ATTUALE nelle analisi Globali e Cinematiche

Di seguito i risultati delle diverse verifiche di sicurezza sismica con gli indicatori di confronto della Capacità dell'edificio con la Domanda richiesta. L'edificio risulta 'adeguato' alle richieste di norma qualora l'indicatore di rischio sismico è maggiore o uguale a uno.

Nome del file di analisi corrispondente dai quali sono estrapolati gli indicatori:

per Analisi globale nel piano: annibal_Caro_consegna3

per Analisi globale fuori dal piano: Liceo_classico_AnnibalCaro_consegna_press_ort

per Analisi cinematica: AnnibalCarocineconsegna

Edificio in muratura con classe d'uso della costruzione (§2.4.2): III

Domanda: valori di riferimento delle accelerazioni e dei periodi di ritorno dell'azione sismica		
Stato limite	Accelerazione (g)	T _{RD} (anni)
Stato Limite di Operatività (SLO)	PGA _{DLO} = 0.073	T _{RDLO} = 45
Stato Limite di Danno (SLD)	PGA _{DLD} = 0.092	T _{RDLD} = 75
Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV)	PGA _{DLV} = 0.253	T _{RDLV} = 712

Tipo di analisi strutturale:

- Analisi sismica statica non lineare (pushover) seguita da dinamica modale con q calcolato in Pushover; q = 3.750
- Analisi sismica dinamica modale (per SLV: con fattore q = 3.00 come da paragrafi 7.8.1.5.3 e 7.8.1.5.2 delle NTC 2018)

Capacità: accelerazione orizzontale di picco al suolo e periodo di ritorno sostenibili dalla costruzione

PGA = accelerazione di picco al suolo con effetti di sito (a_g * S)

TR= Tempo di ritorno

Indicatori di rischio= Rapporto fra capacità e domanda espresso in termini di accelerazioni o tempi di ritorno

- in termini di accelerazione PGA

$\alpha_O = PGA_{CLO} / PGA_{DLO}$ = indicatore di Rischio Sismico in termini di PGA per SLO (Operativo)

$\alpha_D = PGA_{CLD} / PGA_{DLD}$ = indicatore di Rischio Sismico in termini di PGA per SLD (Danno)

$\alpha_V = PGA_{CLV} / PGA_{DLV}$ = indicatore di Rischio Sismico in termini di PGA per SLV (Vita)

- in termini di tempi di ritorno TR

$\alpha_O = TR_{CLO} / TR_{DLO}$ = indicatore di Rischio Sismico in termini di periodo di ritorno TR per SLO (Operativo)

$\alpha_D = TR_{CLD} / TR_{DLD}$ = indicatore di Rischio Sismico in termini di periodo di ritorno TR per SLD (Danno)

$\alpha_V = TR_{CLV} / TR_{DLV}$ = indicatore di Rischio Sismico in termini di periodo di ritorno TR per SLV (Vita)

VERIFICHE DI RESISTENZA e di DEFORMAZIONE STATO ATTUALE

Stato Limite Operativo (SLO):					
VERIFICA DI: Indicatore	Resistenza nel piano del pannello	Resistenza fuori dal piano del pannello	Deformazione nel piano del pannello	Deformazione fuori piano del pannello	Cinematismo
PGA _{CLO} (g)			0.112	0.127	
$\alpha_{O,PGA}$			1.530	1.735	
T _{RCLO} (anni)			111	138	
$\alpha_{O,TR}$			2.462	3.085	

Stato Limite di Danno (SLD):					
VERIFICA DI: Indicatore	Resistenza nel piano del pannello	Resistenza fuori dal piano del pannello	Deformazione nel piano del pannello	Deformazione fuori piano del pannello	Cinematismo
PGA _{CLD} (g)	0.146	0.098	0.146	0.146	0.085
$\alpha_{D,PGA}$	1.580	1.062	1.580	1.580	0.920
T _{RCLD} (anni)	189	83	189	189	61
$\alpha_{D,TR}$	2.526	1.114	2.526	2.526	0.813

Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV):				
VERIFICA DI: Indicatore	Resistenza nel piano del pannello	Resistenza fuori dal piano del pannello	Deformazione nel piano del pannello	Cinematismo
PGA _{CLV} (g)	0.163	0.192	0.163	0.170
$\alpha_{V,PGA}$	0.644	0.761	0.644	0.672
T _{RCLV} (anni)	238	346	238	263
$\alpha_{V,TR}$	0.334	0.486	0.334	0.369

In assenza di interventi volti ad attenuare le vulnerabilità riscontrate, gli indicatori sismici caratteristici del fabbricato sono:

$\alpha_O = PGA_{CLO} / PGA_{DLO} = \text{indicatore di Rischio Sismico in termini di PGA per SLO (Operativo)} = 1.530$

$\alpha_D = PGA_{CLD} / PGA_{DLD} = \text{indicatore di Rischio Sismico in termini di PGA per SLD (Danno)} = 0.920$

$\alpha_V = PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = \text{indicatore di Rischio Sismico in termini di PGA per SLV (Vita)} = 0.644$

Allo stato attuale e nelle condizioni più severe dell'azione sismica, la struttura del Liceo Classico Annibal Caro è in grado di sopportare il 64,40% dell'azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto dello stesso fabbricato di nuova costruzione $\zeta_E = 0,644$.

10. Individuazione delle vulnerabilità e descrizione degli interventi necessari alla loro attenuazione

Per valutare correttamente i risultati fisici delle analisi condotte è necessario riferire sulle interazioni che la struttura scolastica può avere con il fabbricato monumentale dell'Auditorium San Martino. In primo luogo è necessario considerare le diverse tipologie costruttive: muratura multipiano con orizzontamenti a volta per il Liceo Classico (stessa tipologia delle navate laterali della chiesa); struttura muraria monumentale in unica navata centrale a croce per la chiesa di San Martino. Sotto l'azione sismica le strutture alte e massive della chiesa hanno subito rilevanti spostamenti differenziali nella direzione longitudinale della navata, attivando il meccanismo di ribaltamento dell'abside; tali spostamenti sono stati del tutto incompatibili con le deformate consentite dalle volte dell'aula di fisica, rovinata per schiacciamento delle diagonali. Nessun rafforzamento delle murature della scala e/o della volta dell'aula di fisica sarebbero in grado di opporsi alla domanda di spostamenti degli elementi monumentali della Chiesa di San Martino. Per tali ragioni, nell'intervento di messa in sicurezza dell'Auditorium, è stato valutato, calcolato e realizzato un concatenamento in grado di limitare gli spostamenti relativi dei corpi che hanno arrecato il maggior danno alle strutture.

La scala che conduce all'aula di fisica del Liceo Classico, le volte dell'aula e le murature di loro pertinenza possono essere ora riparate e rafforzate nel rispetto delle proprie funzioni strutturali, ritenendo gli spostamenti compatibili. In altri termini l'intervento di messa in sicurezza dell'Auditorium San Martino ha attenuato in maniera significativa la principale vulnerabilità del complesso edilizio, consentendo la riparazione e il consolidamento delle parti strutturali gravemente danneggiate.

Valutando il comportamento globale del fabbricato e con riferimento ai cinematismi studiati, l'incremento del livello di sicurezza del fabbricato, sede del Liceo Classico, si raggiunge con interventi mirati a:

- Completare e/o rafforzare il sistema di tirantatura del corpo di fabbrica prospiciente via Giacomo Leopardi come riportato nell'elaborato grafico Tav. 08;
- Riparare e rafforzare tutte le strutture murarie che sorreggono la volta dell'aula di fisica e la scala adiacente;
- Consolidare le volte danneggiate dell'aula con interventi extra dorsali che conferiscono più duttilità alle strutture;
- Rinforzare tutti gli ammorsamenti murari che hanno manifestato distaccamenti nelle connessioni;

- Riparare e rafforzare gli archi e le volte danneggiati e indicati nella Tav. 02 e quelli che, sottoposti a specifiche verifiche locali, non daranno esito positivo di resistenza rispetto alla richiesta normativa.

L'esecuzione dei lavori di miglioramento sismico del fabbricato richiederà una specifica progettazione esecutiva sulla base di approfondimenti d'indagine estesi anche alle parti oggi non completamente ispezionabili (sotterranei, sottotetto e tetto). La pianificazione degli interventi dovrà tener conto dell'attività scolastica e studiare un programma di manutenzione delle strutture per accertare lo stato di conservazione e coordinare gli eventuali interventi necessari al risanamento e/o al consolidamento.

11. Valutazioni finali sullo stato della struttura.

Considerata la composizione e la tipologia della scuola, indagato sullo stato del danno e sulle caratteristiche meccaniche dei materiali che la compongono, studiata e valutata l'efficacia delle opere di miglioramento sismico effettuate nelle diverse epoche d'intervento e viste le analisi sismiche condotte, **la struttura scolastica sede del Liceo Classico "Annibal Caro" è idonea ad assolvere alle funzioni statiche e sismiche oggi richieste dalla norma vigente per la specifica classe d'uso di strutture esistenti.** Gli interventi di miglioramento sismico effettuati hanno condotto ad un rapporto del 64,40% tra la capacità di reazione sismica effettiva della struttura e la domanda richiesta dalla norma per gli edifici analoghi di nuova costruzione. **Si ritengono comunque necessarie le opere descritte al punto precedente, compatibili con la natura del bene culturale, indispensabili per il conseguimento della piena agibilità delle parti oggi interdette per i gravi danni riportati.**

Gli interventi sopra consigliati, ancorché sottoposti a specifica progettazione strutturale, saranno necessari ad attenuare le maggiori vulnerabilità della struttura e consentiranno un sensibile miglioramento del comportamento sismico globale dello storico edificio scolastico "Annibal Caro". Data la valenza culturale del bene analizzato e l'impossibilità a procedere con interventi generali e invasivi sulle strutture che ricevono il massimo sforzo sismico, si ritiene di dover escludere la possibilità di un adeguamento sismico della struttura scolastica.

Nella pianificazione degli interventi di riparazione è auspicabile apportare i miglioramenti proposti al fine di aumentare l'indicatore di rischio sismico della scuola in conformità alle disposizioni normative di recente emanazione, che tra l'alto, NON richiedono il pieno adeguamento sismico nemmeno per quelle costruzioni esistenti che si vogliono oggi trasformare in classe III ad uso scolastico.

Tanto dovevo ad evasione del prestigioso incarico affidatomi.

Montappone, lì 10/05/2018

Il Tecnico
Dott./Ing. Egidio Santucci



The stamp is circular and blue. It contains the text: 'ORDINE degli INGEGNERI e ARCHITETTI della PROVINCIA di FERMO' around the top edge. In the center, it says 'Egidio SANTUCCI' and 'Ingegnere'. Below that, it lists 'a - civile', 'b - industriale', and 'c - dell'informazione'. At the bottom, it has the number 'A235'.