



$f_{a,SLV}$  ottenuti (valori minimi nelle due direzioni x e y) è riportato in Tabella 3.

Tabella 3. Valori minimi di  $f_{a,SLV}$  (Direttiva-NTC2008)

	meccanismi di piano		collasso con modo triangolare	
	con $a_g$ al suolo	con $a_g$ a livello impalcato	con $a_g$ al suolo	con $a_g$ a livello impalcato
PT	< 0.30		< 0.30	
P1	< 0.30	< 0.25	< 0.30	< 0.25
P2	< 0.30	< 0.16	< 0.30	< 0.12

Il fattore di accelerazione dell'edificio risulta quindi:

$f_{a,SLV} < 0.12$  nell'ipotesi di collasso con modo triangolare

$f_{a,SLV} < 0.16$  nell'ipotesi di collasso per piano debole.

Entrambi si ottengono al secondo piano per accelerazione riportata all'altezza impalcato.

L'indice di sicurezza in termini di periodo di ritorno risulta invece:

$I_{s,SLV} < 0.04$  nell'ipotesi di collasso con modo triangolare

$I_{s,SLV} < 0.07$  nell'ipotesi di collasso per piano debole.

A questo punto è interessante confrontare i risultati ottenuti con quelli derivanti dall'applicazione della versione della Direttiva allineata con l'OPCM 3431. I corrispondenti valori del fattore di accelerazione sono riportati in Tabella 4 e risultano sostanzialmente in linea con quelli dati dalla nuova Direttiva-NTC2008.

Tabella 4. Valori del fattore di accelerazione (Direttiva allineata con OPCM 3431)

	collasso piano k-esimo		collasso uniforme	
	con $a_g$ al suolo	con $a_g$ a livello impalcato	con $a_g$ al suolo	con $a_g$ a livello impalcato
PT	0.176		0.205	
P1	0.224	0.163	0.174	0.126
P2	0.336	0.117	0.130	0.045

### 3.3. Verifica a taglio e a pressoflessione dei singoli maschi murari

Allo scopo di effettuare una prima verifica dell'attendibilità del metodo di valutazione proposto nella Direttiva per i palazzi e descritto ai

paragrafi precedenti, utilizzando i dati forniti nel foglio di calcolo, sono state effettuate anche le verifiche a taglio e a pressoflessione dei singoli maschi murari, confrontando il taglio/momento agente di calcolo con il taglio/momento resistente, secondo le relazioni proposte al punto 7.8.2.2 delle NTC2008 e C8.7.1 della Circolare 2009.

In particolare, il momento ultimo resistente è stato calcolato come:

$$M_u = \frac{l^2 t \sigma_0}{2} \left( 1 - \frac{\sigma_0}{0.85 f_d} \right) \quad (14)$$

dove  $l$  è la lunghezza complessiva della parete;  $t$  è lo spessore della zona compressa della parete;  $\sigma_0$  è la tensione normale media, riferita all'area totale della sezione;  $f_d$  è la resistenza a compressione di calcolo della muratura.

La resistenza a taglio di calcolo per fessurazione diagonale per azioni nel piano viene valutata con la relazione:

$$V_t = 1 \cdot t \cdot \frac{1.5 \tau_{0d}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5 \tau_{0d}}} \quad (15)$$

dove  $b$  è un coefficiente correttivo legato alla distribuzione degli sforzi sulla sezione, dipendente dalla snellezza della parete ( $b = h/l$ , comunque non superiore a 1.5 e non inferiore a 1, dove  $h$  è l'altezza del pannello), mentre gli altri parametri sono definiti come sopra.

I risultati relativi alle verifiche dei maschi murari di ciascun piano sono riportati in Tabella 5 in termini di percentuale di setti non verificati. Si nota come l'elevato numero di verifiche non soddisfatte sia in linea con i ridotti valori ottenuti per l'indice di sicurezza  $I_s$ .

	Verifica a taglio	Verifica a flessione
PT	100%	3%
P1	98%	37%
P2	75%	23%

Tabella 5.  
Percentuale di setti non verificati

#### 4 Valutazione di vulnerabilità sismica (Livello LV2):

##### Meccanismi di collasso locali

In relazione all'analisi dei dissesti avvenuti a seguito dell'evento sismico, si sono ipotizzati alcuni possibili meccanismi locali. A titolo di esempio in questo paragrafo si prendono in considerazione i meccanismi di collasso relativi alla facciata fronte Piazza San Bernardino (Figura 22a). Si considerano di seguito due tipologie di cinematismo:

- ribaltamento composto di cuneo diagonale ad un piano, in particolare l'ultimo livello dell'edificio, come mostrato in Figura 22b;
- ribaltamento composto di cuneo diagonale coinvolgente più piani, in particolare l'intera facciata, con formazione di cerniera a livello del suolo.

Tali meccanismi si manifestano attraverso la rotazione rigida delle pareti soggette ad azione sismica attorno a cerniere cilindriche orizzontali ed il trascinarsi di porzioni di muratura appartenenti alle pareti di controvento. Il meccanismo è favorito dalla presenza di coperture spingenti e dalla scadente fattura delle pareti di controvento.

La Circolare 2009 (punto C8A.4) suggerisce di effettuare le verifiche con riferimento ai meccanismi locali di danno e collasso (nel piano e fuori piano) tramite l'analisi limite dell'equilibrio, secondo l'approccio cinematico, basato sulla scelta del meccanismo di collasso e la valutazione dell'azione orizzontale che attiva tale cinematismo. L'analisi ha lo scopo di valutare le condizioni di equilibrio limite dei macroelementi sollecitati

Figura 22. (a) Schema di ribaltamento della facciata fronte Piazza San Bernardino; (b) Prospetto via San Giacomo della Marca: fessura che identifica il cuneo di distacco



(a)



(b)

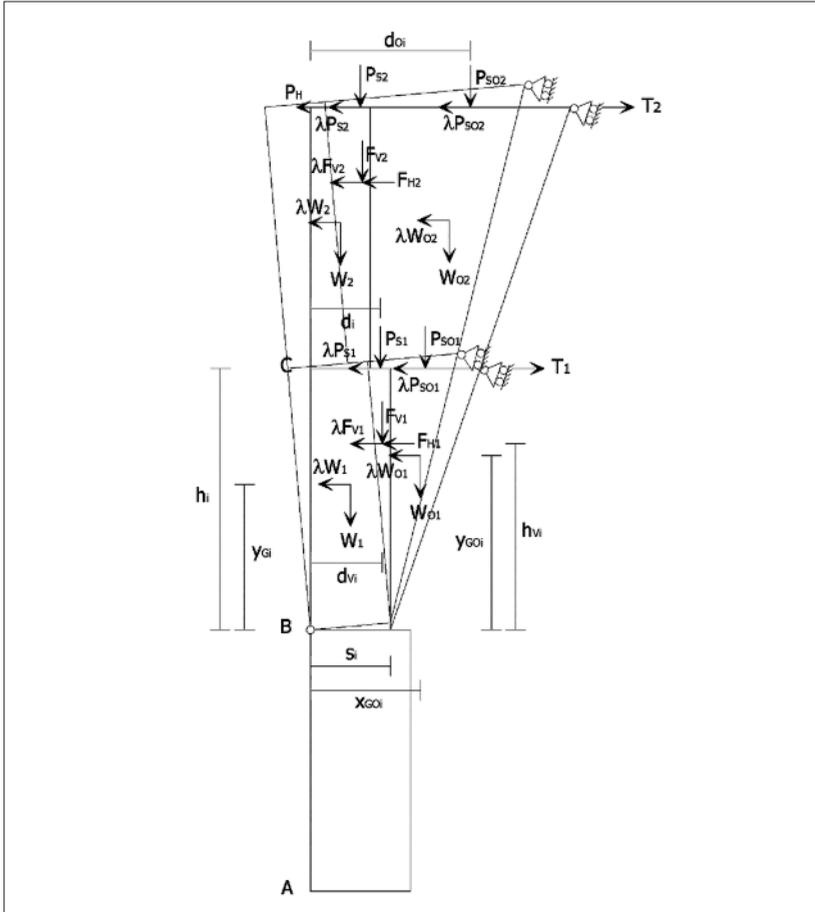
dal sisma, assumendo le seguenti ipotesi: resistenza della muratura nulla a trazione ed infinita a compressione, assenza di scorrimento tra i blocchi. Per ogni possibile meccanismo locale ritenuto significativo per l'edificio, il metodo si articola nei seguenti passi:

- trasformazione di una parte della costruzione in un sistema labile (catena cinematica), attraverso l'individuazione di corpi rigidi, definiti da piani di frattura ipotizzabili per la scarsa resistenza a trazione della muratura, in grado di ruotare o scorrere tra loro (meccanismo di danno e collasso);
- valutazione del moltiplicatore orizzontale dei carichi  $\alpha_0$  che comporta l'attivazione del meccanismo (stato limite di danno);
- valutazione dell'evoluzione del moltiplicatore orizzontale dei carichi  $\alpha$  al crescere dello spostamento  $d_k$  di un punto di controllo della catena cinematica, usualmente scelto in prossimità del baricentro delle masse, fino all'annullamento della forza sismica orizzontale;
- trasformazione della curva così ottenuta in curva di capacità, ovvero in accelerazione  $a^*$  e spostamento  $d^*$  spettrali, con valutazione dello spostamento ultimo per collasso del meccanismo (stato limite ultimo);
- verifiche di sicurezza, attraverso il controllo della compatibilità degli spostamenti e/o delle resistenze richieste alla struttura.

Lo schema di calcolo è riportato in Figura 23, con il seguente significato dei simboli per l' $i$ -esimo piano:

- $W_i$  è il peso proprio della parete di facciata;
- $W_{O_i}$  è il peso proprio della porzione del cuneo di distacco appartenente al piano  $i$ -esimo;
- $F_V$  è la componente verticale della spinta di archi o volte sulla parete;
- $F_{Hi}$  è la componente orizzontale della spinta di archi o volte sulla parete;
- $P_{Si}$  è il peso del solaio o della copertura sulla parete calcolato in base all'area di influenza;
- $P_{SO_i}$  è il peso del solaio agente sulla porzione di cuneo al piano  $i$ -esimo;

Figura 23. Schema di calcolo del cinematisimo



- $P_{Hi}$  è la spinta statica trasmessa dalla copertura;
- $T_i$  è l'azione del tirante eventualmente presente in testa alla parete;
- $s_i$  è lo spessore della parete di facciata;
- $h_i$  è l'altezza della parete di facciata rispetto alla cerniera in A o comunque la quota del punto di applicazione dell'azione trasmessa dai solai o dai tiranti rispetto alla cerniera B;
- $h_{vi}$  è la quota del punto di applicazione della spinta di archi o volte rispetto alla cerniera B;
- $d_i$  è la distanza orizzontale del punto di applicazione del carico del solaio sulla parete di facciata rispetto alla cerniera in B;
- $d_{vi}$  è la distanza orizzontale del punto di applicazione del carico

- di archi o volte sulla parete di facciata rispetto alla cerniera in B;
- $d_{O_i}$  è il braccio orizzontale del punto di applicazione del carico trasmesso dal solaio alla porzione di cuneo di distacco al piano  $i$ -esimo rispetto alla cerniera posta in B;
  - $x_{GO_i}$  è la distanza orizzontale del baricentro del cuneo di distacco al piano  $i$ -esimo rispetto alla cerniera in B;
  - $y_{GO_i}$  è la quota del baricentro del cuneo al piano  $i$ -esimo rispetto alla cerniera in B.

Figura 24. Caratterizzazione geometrica dei macroelementi e risultati del calcolo (cerniera a livello del secondo impalcato)

CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DEI MACROELEMENTI									
Elevazione	Spessore della parete al piano $i$ -esimo $s_i$ [m]	Altezza di interpiano al piano $i$ -esimo $h_i$ [m]	Braccio orizzontale del carico del solaio al piano $i$ -esimo rispetto alla cerniera cilindrica $d_i$ [m]	Braccio orizzontale dell'azione di archi o volte al piano $i$ -esimo rispetto alla cerniera cilindrica $d_{V_i}$ [m]	Quota del baricentro della parete al piano $i$ -esimo $y_{G_i}$ [m]	Quota del punto di applicazione di azioni trasmesse da archi o volte al piano $i$ -esimo $h_{V_i}$ [m]	Distanza orizzontale del baricentro del cuneo di controvento al piano $i$ -esimo rispetto alla cerniera cilindrica $x_{GO_i}$ [m]	Quota del baricentro del cuneo di controvento al piano $i$ -esimo $y_{GO_i}$ [m]	Braccio orizzontale del carico del solaio sul cuneo di controvento al piano $i$ -esimo rispetto alla cerniera cilindrica $d_{O_i}$ [m]
1	1.00	5.40	0.50		0.00		0.00	0.00	0.00
2	1.00	5.90	0.50		0.00		0.00	0.00	0.00
3	1.00	6.60	0.50		3.30		1.97	4.40	2.95
4									

AZIONI SUI MACROELEMENTI								Arretramento della cerniera attorno alla quale avviene il ribaltamento rispetto al lembo esterno della parete [m]
Elevazione	Peso proprio della parete al piano $i$ -esimo $W_i$ [kN]	Peso proprio del cuneo di controvento al piano $i$ -esimo $W_{O_i}$ [kN]	Carico trasmesso dal solaio al piano $i$ -esimo $P_{S_i}$ [kN]	Carico trasmesso dal solaio sul cuneo di controvento al piano $i$ -esimo $P_{SO_i}$ [kN]	Spinta statica della copertura $P_H$ [kN]	Componente verticale della spinta di archi o volte al piano $i$ -esimo $F_{V_i}$ [kN]	Componente orizzontale della spinta di archi o volte al piano $i$ -esimo $F_{H_i}$ [kN]	
1	0.0	0.0	0.0	0.0				
2	0.0	0.0	0.0	0.0				
3	4352.8	1291.6	554.0	920.1				
4								

MOMENTO DELLE AZIONI STABILIZZANTI						
Ribaltamento delle elevaz.	Peso proprio delle pareti [kNm]	Peso proprio del cuneo di controvento [kNm]	Carico dei solai [kNm]	Carico dei solai sui cunei di controvento [kNm]	Azione di archi o volte [kNm]	Azione dei tiranti [kNm]
3	2176.42	2544.44	276.98	2714.36	0.00	0.00

MOMENTO DELLE AZIONI RIBALTANTI								MULTIPLICATORE DI COLLASSO $\alpha_0$	
Ribaltamento delle elevaz.	Inerzia delle pareti [kNm]	Inerzia dei cunei di controvento [kNm]	Inerzia dei solai [kNm]	Inerzia dei solai sui cunei di controvento [kNm]	Inerzia di archi o volte [kNm]	Spinta statica di archi o volte [kNm]	Spinta statica della copertura [kNm]	Ribaltamento delle elevazioni:	Valore di $\alpha_0$
3	63551.35	20278.02	9915.72	16470.18	0.00	0.00	0.00	3	0.070

CALCOLO DELLE PGA								
Ribaltamento delle elevaz.	Massa partecipante $M^*$	Frazione massa partecipante $e^*$	Accelerazione spettrale $a_0^*$ [m/s <sup>2</sup> ]	Altezza baricentro delle forze peso $Z$ [m]	Fattore di Struttura $q$	posizione	Accelerazione di collasso $D$ [m/s <sup>2</sup> ]	C/D
3	661.549	0.912	0.558	4.18	3.00	su altra parete	0.73	0.769

La procedura è stata implementata in un foglio di calcolo, di cui si riportano i risultati in Figura 24 e Figura 25 per le due diverse tipologie di cinematicismo considerate.

Figura 25.  
Caratterizzazione geometrica dei macroelementi e risultati del calcolo (cerniera al suolo)

I risultati in termini di rapporto tra accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo e l'accelerazione di riferimento (Capacità/Domanda) sono:

- cerniera a livello del secondo impalcato → Capacità/Domanda =  $C/D = 0.77$
- cerniera al suolo → Capacità/Domanda =  $C/D = 0.47$

CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DEI MACROELEMENTI									
Elevazione	Spessore della parete al piano i-esimo $S_i$ [m]	Altezza di interpiano al piano i-esimo $h_i$ [m]	Braccio orizzontale del carico del solaio al piano i-esimo rispetto alla cerniera cilindrica $d_i$ [m]	Braccio orizzontale dell'azione di archi o volte al piano i-esimo rispetto alla cerniera cilindrica $d_{vi}$ [m]	Quota del baricentro della parete al piano i-esimo $Y_{Gi}$ [m]	Quota del punto di applicazione di azioni trasmesse da archi o volte al piano i-esimo $h_{vi}$ [m]	Distanza orizzontale del baricentro del cuneo di controvento al piano i-esimo rispetto alla cerniera cilindrica $X_{SOi}$ [m]	Quota del baricentro del cuneo di controvento al piano i-esimo $Y_{COi}$ [m]	Braccio orizzontale del carico del solaio sul cuneo di controvento al piano i-esimo rispetto alla cerniera cilindrica $d_{Ci}$ [m]
1	1.00	5.40	0.50		2.70		0.59	3.60	0.89
2	1.00	5.90	0.50		8.35		1.43	8.70	1.86
3	1.00	6.60	0.50		14.80		2.45	14.85	2.95
4									
AZIONI SUI MACROELEMENTI									Arretramento della cerniera attorno alla quale avviene il ribaltamento rispetto al lembo esterno della parete [m]
Elevazione	Peso proprio della parete al piano i-esimo $W_i$ [kN]	Peso proprio del cuneo di controvento al piano i-esimo $W_{CO}$ [kN]	Carico trasmesso dal solaio al piano i-esimo $P_{Si}$ [kN]	Carico trasmesso dal solaio sul cuneo di controvento al piano i-esimo $P_{SOi}$ [kN]	Spinta statica della copertura $P_{H}$ [kN]	Componente verticale della spinta di archi o volte al piano i-esimo $F_{vi}$ [kN]	Componente orizzontale della spinta di archi o volte al piano i-esimo $F_{Hi}$ [kN]	Azione del tirante al piano i-esimo $T_i$ [kN]	
1	3561.4	1774.3	1189.0	314.4					
2	3891.2	728.5	675.6	622.9					
3	4352.8	148.6	554.0	920.1					
4									
MOMENTO DELLE AZIONI STABILIZZANTI									
Ribaltamento delle elevaz.	Peso proprio delle pareti [kNm]	Peso proprio del cuneo di controvento [kNm]	Carico dei solai [kNm]	Carico dei solai sui cunei di controvento [kNm]	Azione di archi o volte [kNm]	Azione dei tiranti [kNm]			
3 - 2 - 1	5902.7	2452.7	1209.2	4152.7	0.0	0.0			
MOMENTO DELLE AZIONI RIBALTANTI								MULTIPLICATORE DI COLLASSO $\alpha_D$	
Ribaltamento delle elevaz.	Inerzia delle pareti [kNm]	Inerzia dei cunei di controvento [kNm]	Inerzia dei solai [kNm]	Inerzia dei solai sui cunei di controvento [kNm]	Inerzia di archi o volte [kNm]	Spinta statica di archi o volte [kNm]	Spinta statica della copertura [kNm]	Ribaltamento delle elevazioni:	Valore di $\alpha_D$
3 - 2 - 1	175857.7	20545.7	23969.9	25206.3	0.0	0.0	0.0	3 - 2 - 1	0.056
CALCOLO DELLE PGA									
Ribaltamento delle elevaz.	Massa partecipante $M^*$	Frazione massa partecipante $e^*$	Accelerazione spettrale $a_{0.1}^*$ [m/s <sup>2</sup> ]	Altezza baricentro delle forze peso $Z$ [m]	Fattore di Struttura $q$	posizione	Accelerazione di collasso $D$ [m/s <sup>2</sup> ]	C/D	
3 - 2 - 1	1461.0	0.765	0.531	7.80	3.00	a terra	1.14	0.467	

## 5. Alcune considerazioni

L'elevato numero di verifiche dei pannelli murari non soddisfatte, soprattutto a taglio, è in linea con i valori estremamente bassi ottenuti per i parametri di vulnerabilità sismica  $I_{S,SLV}$  e  $f_{a,SLV}$ . Tale comportamento può essere attribuibile alla considerevole massa sismica in gioco associata ad una scarsa resistenza dei materiali.

A conclusione di questa prima fase di studio si è eseguito il ricalcolo del parametro  $f_{a,SLV}$  nell'ipotesi di poter aumentare il livello di conoscenza del manufatto. In particolare supponendo di poter:

- ridurre il fattore di conoscenza da 1.35 a 1.0;
- incrementare la resistenza dei materiali di un fattore 1.5- 2;
- aumentare l'area dei setti murari portanti di circa 10% a seguito di indagini più approfondite su pannelli dei quali, in questa prima fase del lavoro, non è stato possibile identificare la funzione e che quindi sono stati ipotizzati non portanti al fine della valutazione LV1.

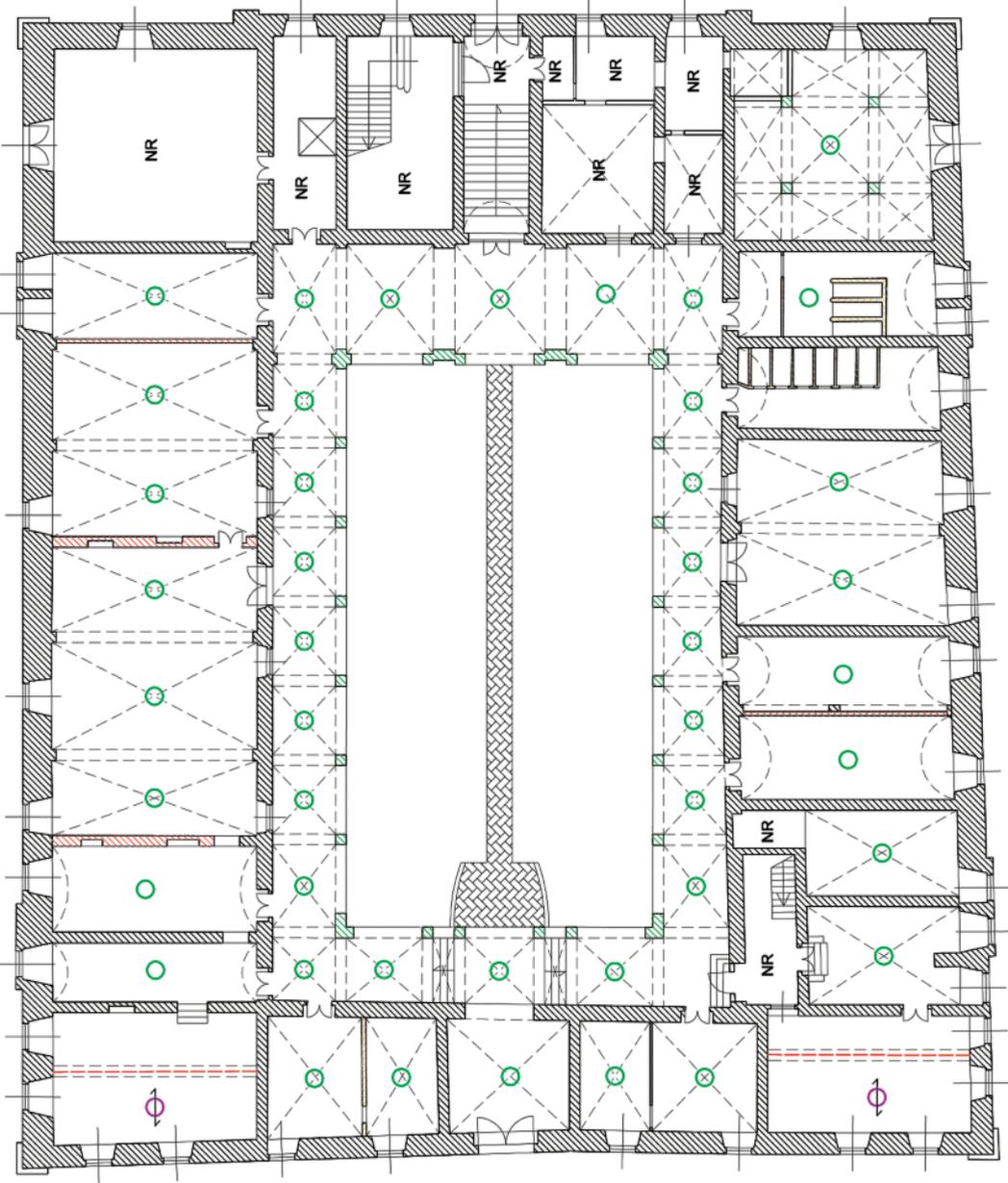
Per quanto riguarda il piano terra, tali modifiche determinano un valore del fattore  $f_{a,SLV}$  pari a circa 0,40, mentre per i piani superiori pari a circa 0,30.

NR	Non rilevato
	Muratura in blocchi di pietra non squadrata con inclusione di elementi in laterizio
	Muratura in blocchi di pietra squadrata
	Muratura in pietrame disordinata e ricorsi di mattoni
	Muratura in mattoni semipieni con rifoderia in laterizio o pietre in foglio
	Muratura di tamponamento ipotizzata in blocchi forati
	Muratura in mattoni pieni
	Volte in laterizio a foglio
	Solaio in laterizio ed acciaio
	Solaio in carriccio
	Trave in cemento armato

	Muratura in mattoni pieni
	Volte in laterizio a foglio
	Solaio in laterizio ed acciaio
	Solaio in carriccio
	Trave in cemento armato

Allegato 1

PIAZZA DEL TEATRO



NORD

PIAZZA SAN BERNARDINO

NR	Non rilevato
	Muratura in blocchi di pietra non squadrata con inclusione di elementi in laterizio
	Muratura in blocchi di pietra squadrata
	Muratura in pietrame disordinata e ricorsi di mattoni
	Muratura in mattoni semipieni con rifoderia in lavelle in laterizio poste in foglio
	Muratura di lamponamento ipotizzata in blocchi forati
	Muratura in mattoni pieni
	Volte in laterizio a foglio
	Solaio in laterizio ed acciaio
	Solaio in cunicolo
	Trave in cemento armato

SCUOLA ELEMENTARE  
DE AMICIS  
L'AQUILA

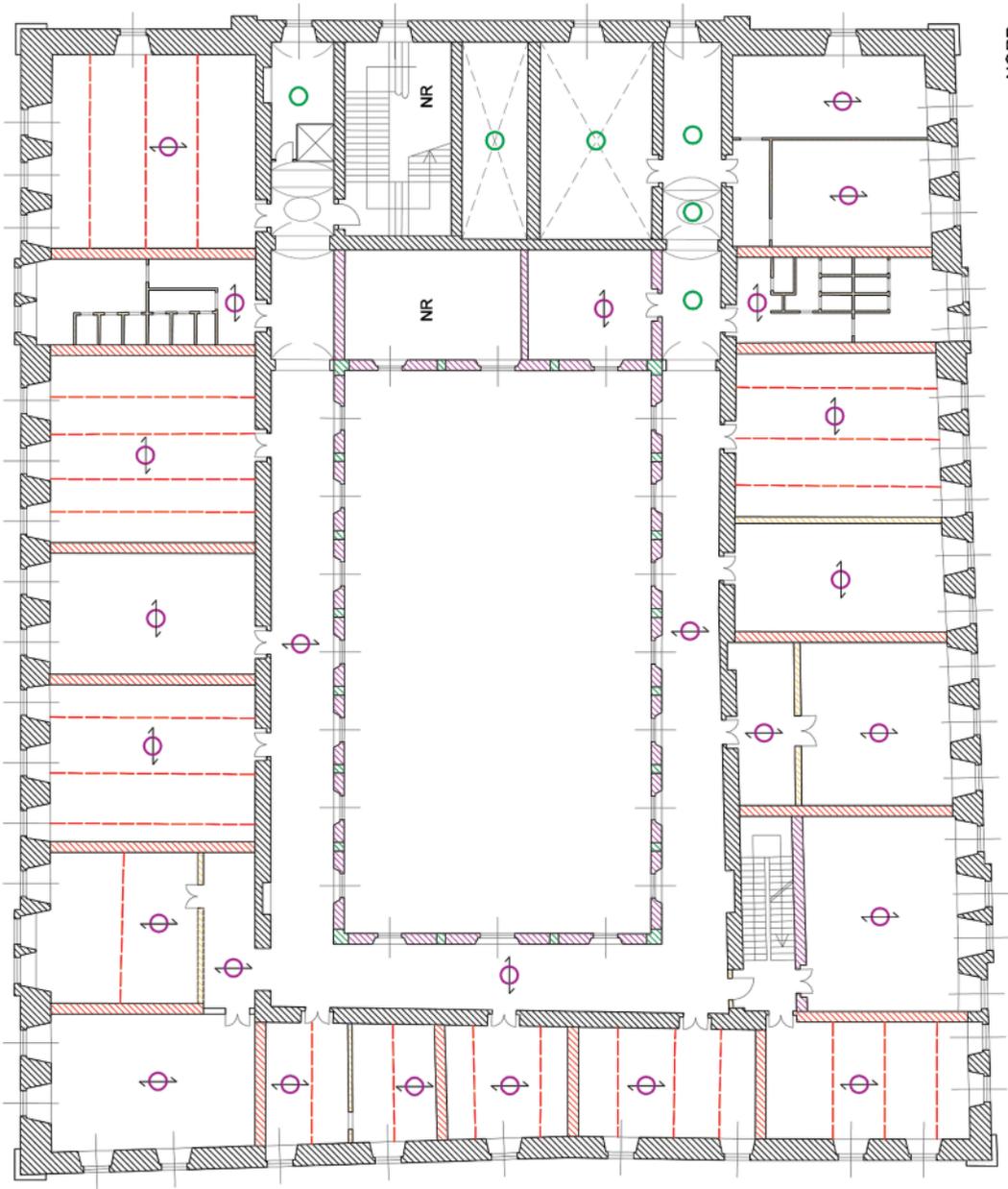
PIANTA PIANO PRIMO

analisi dei materiali

Allegato 2

PIAZZA  
DEL TEATRO

NORD  
↻



PIAZZA  
SAN BERNARDINO

NR	Non rilevato		Muratura in blocchi di pietra non squadrata con inclusione di elementi in laterizio
			Muratura in blocchi di pietra squadrata
			Muratura in pietrame disordinata e ricorsi di mattoni
			Muratura in mattoni semipieni con rifoderatura in laterizio poste in foglio
			Muratura di tamponamento spazzolata in blocchi forati
			Muratura in mattoni pieni
			Volte in laterizio e foglio
			Solai in laterizio ed acciaio
			Solai in cernice
			Trave in cemento armato

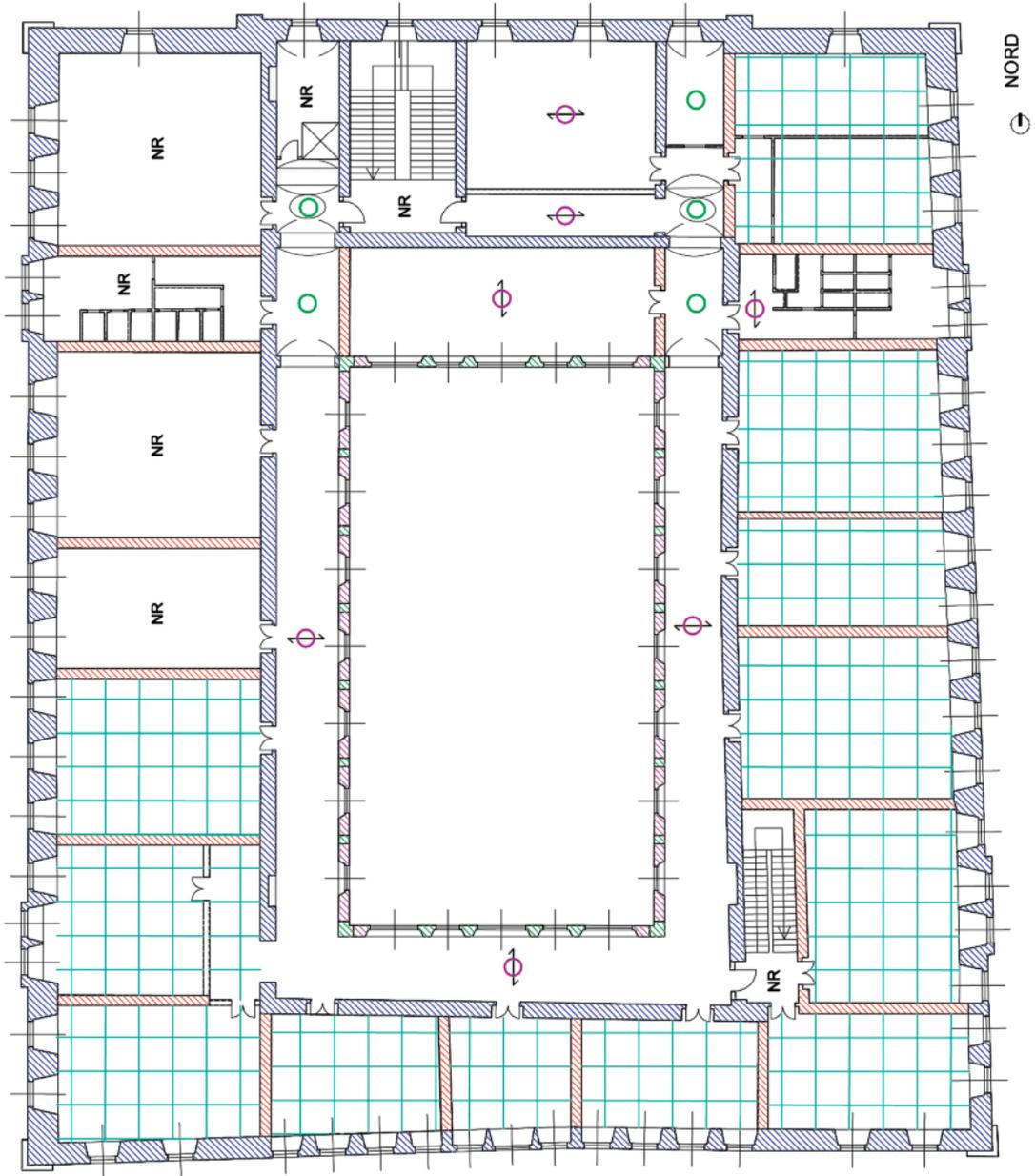
SCUOLA ELEMENTARE  
DE AMICIS  
L'AQUILA

PIANTA PIANO SECONDO

analisi dei materiali

Allegato 3

PIAZZA  
DEL TEATRO



NORD

PIAZZA  
SAN BERNARDINO

Capriata in acciaio



Capriata in legno



Capriata in legno ipolizzate



Muratura in pietrame disordinata e ricorsi di mattoni



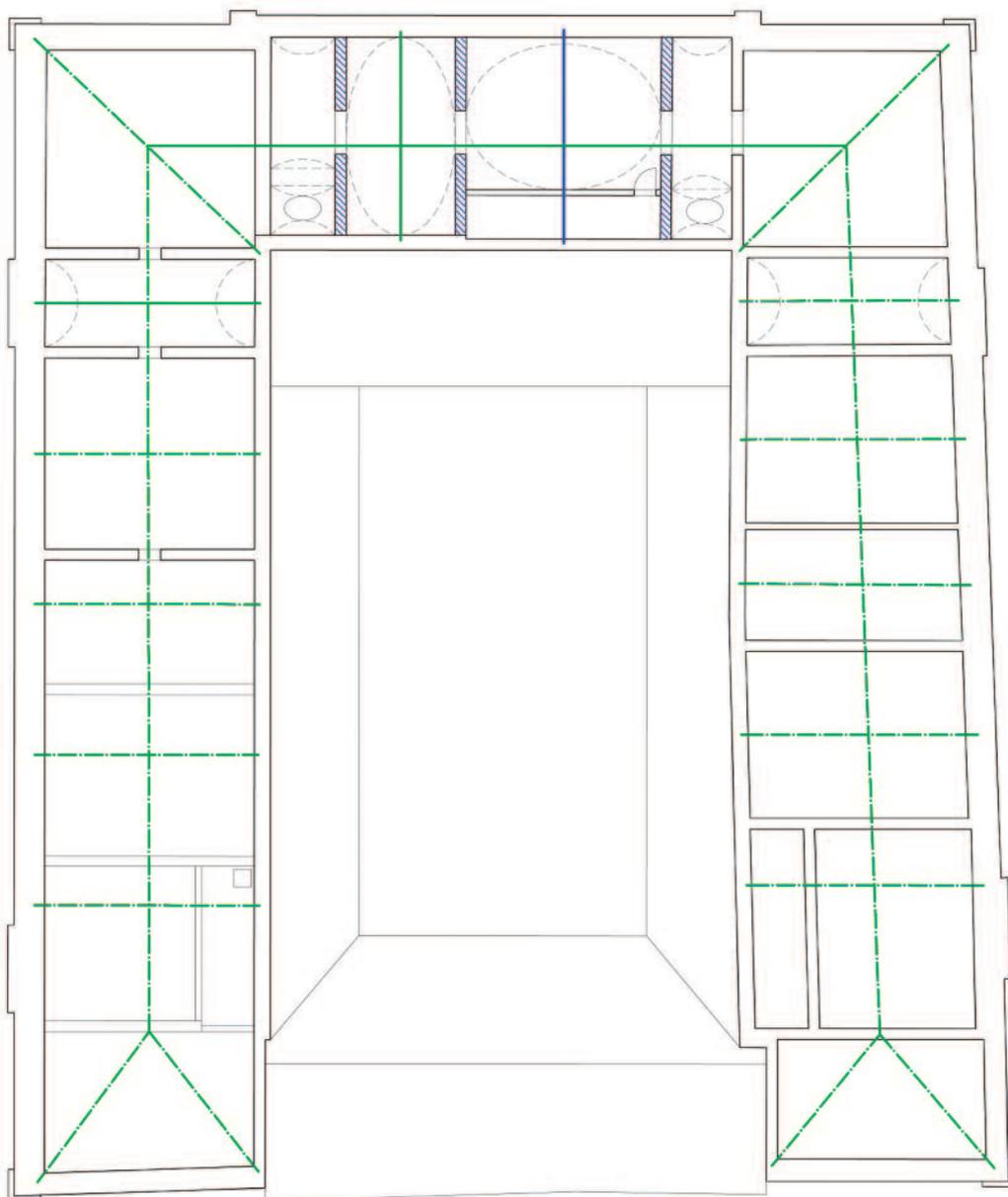
SCUOLA ELEMENTARE  
DE AMICIS  
L'AQUILA

PIANTA PIANO COPERTURA

analisi dei materiali

Allegato 4

PIAZZA  
DEL TEATRO



⊖ NORD

PIAZZA  
SAN BERNARDINO