



CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DELLA MURATURA DELLA TORRE GHIRLANDINA DI MODENA

Convenzione tra

DISTART

Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del
Rilevamento, del Territorio
Alma Mater Studiorum - Università Di Bologna

e

COMUNE DI MODENA

Rep. DISTART N. 24 del 14/04/2009

Prot. DISTART N. 349 del 14/04/2009

Responsabile scientifico della convenzione:

Prof. Ing. Giovanni Pascale

Responsabile della sperimentazione:

Dr. Arch. Camilla Colla



Laboratorio Resistenza Materiali

Sommario

1. Indagini soniche	3
Piano interrato, -2,79m.....	6
Posizioni di prova NA, OA, pianta a quota -2,79m	7
Posizioni di prova OB, SB, pianta a quota -2,79m	8
Posizioni di prova SA, EA, pianta a quota -2,79m	9
Posizioni di prova SC, EC, pianta a quota -2,79m.....	10
Piano terra, 0,00m	12
Posizioni di prova OA, SA, SBest, OCest, pianta a quota 0,00m.....	13
Posizioni di prova OB, SC, OAest, pianta a quota 0,00m.....	18
Posizioni di prova NA, NB, OBest, pianta a quota 0,00m	20
Posizione di prova NC, pianta a quota 0,00m.....	23
Posizioni di prova EA, SB, EBest, pianta a quota 0,00m.....	24
Piano uno, 3,44m	27
Posizioni di prova OC, EA, pianta a quota 3,44m	28
Posizione di prova SB, pianta a quota 3,44m	30
Posizione di prova SC, pianta a quota 3,44m	31
Posizioni di prova SA, NA, pianta a quota 3,44m	32
Posizioni di prova EB, NB, pianta a quota 3,44m	34
Posizioni di prova NC, OB, pianta a quota 3,44m.....	35
Posizioni di prova EC, ED, OA, OD, pianta a quota 3,44m.....	36
Posizioni di prova OFest, OE, pianta a quota 3,44m	39
Piano due, 9,62m.....	41
Posizioni di prova NAest, NB, EF, pianta a quota 9,62m	42
Posizioni di prova EA, SA, pianta a quota 9,62m.....	45
Posizioni di prova OA, SB, pianta a quota 9,62m	47
Posizioni di prova SC, EB, pianta a quota 9,62m	48
Posizione di prova SD, pianta a quota 9,62m	49
Posizioni di prova OC, OCest, pianta a quota 9,62m.....	50
Posizioni di prova ND, NEest, pianta a quota 9,62m.....	52
Posizioni di prova ED, EEest, SF, pianta a quota 9,62m	54
Posizioni di prova NC, SE, OB, EC, pianta a quota 9,62m.....	57
Piano tre, 23,00m	59
Piano quattro, 30,00m	60
Stanza dei torresani, 35,42m.....	61
Stanza delle campane, 42,57m.....	62
Cuspide, livello zero, 49,36m.....	63
Cuspide, livello uno, 57,12m.....	64
Cuspide, livello due, 62,00m.....	65
Cuspide, livello tre, 66,00m.....	65
Cuspide, livelli quattro e cinque, 75,90m.....	66
2. Elaborazioni dei risultati delle prove soniche	67
3. Esecuzione di microcarotaggi	82
4. Prove di compressione sui materiali.....	84
Laterizio.....	84
Malta.....	86
5. Stima delle proprietà meccaniche della muratura	88

Introduzione

Questa relazione si riferisce ad una indagine commissionata dal Comune di Modena al Dipartimento DISTART dell'Università di Bologna, finalizzata alla caratterizzazione non distruttiva e meccanica della muratura interna ed esterna della torre Ghirlandina di Modena.

La convenzione prevedeva lo svolgimento, da parte del DISTART, delle seguenti attività.

- Ispezione visuale della struttura e delle sue parti.
- Progettazione della campagna d'indagine, con definizione delle posizioni di prova, della strumentazione da impiegare e delle modalità di indagine.
- Esecuzione di prove soniche per la valutazione dell'omogeneità della muratura.
- Eventuali ulteriori indagini non distruttive in posizioni significative per valutare lo spessore del rivestimento in pietra e per individuare eventuali distacchi.
- Prelievo di microcarote di laterizio, estrazione di carote di laterizio contenenti giunto di malta ed esecuzione di prove penetrometriche e/o meccaniche su malte, per valutare la resistenza a compressione della muratura e a taglio dei giunti di malta.
- Elaborazione e rappresentazione dei risultati. Valutazione dei risultati delle prove e dei rilievi eseguiti, con redazione di un rapporto finale.

Nel seguito sono descritte le attività di indagine eseguite.

Per quanto riguarda le indagini non distruttive, gli scopi di prova sono consistiti principalmente nel valutare l'omogeneità delle murature della torre in base ai valori di velocità di propagazione dei segnali sonici in varie configurazioni di prova.

Le prove meccaniche su provini di laterizio e di malta estratti dalle murature avevano lo scopo di giungere ad una stima dei valori di resistenza a compressione della muratura.

Le indagini in situ sono state eseguite nel periodo da Giugno 2009 a Marzo 2010.

1. Indagini soniche

Le prove soniche consistono nel sollecitare una porzione di muratura utilizzando un martello strumentato con una cella di carico. Il martello colpisce, attraverso un breve impatto di tipo elastico, punti prestabiliti della superficie indagata generando delle onde elastiche che si propagano all'interno del mezzo. Il segnale è caratterizzato da una maggiore lunghezza d'onda rispetto a quello ultrasonico e favorisce maggiori profondità di penetrazione del materiale.

La propagazione dell'onda elastica all'interno dell'elemento strutturale è rilevata attraverso un accelerometro. Per ogni percorso di misura viene dunque registrata, da una stazione di acquisizione dei dati, una coppia di forme d'onda: il segnale generato dal martello e il segnale ricevuto dopo la propagazione all'interno del materiale.

Le indagini soniche possono essere compiute secondo modalità diverse, le quali dipendono dalla posizione relativa fra il martello e il ricevitore sull'elemento: la trasmissione può essere diretta, superficiale o semidiretta (Fig 1.1).

Il metodo di trasmissione diretta, o per trasparenza, consiste nella scelta di punti di emissione e di ricezione del segnale sonico posti su due superfici opposte dell'elemento strutturale indagato; sorgente e ricevitore sono posizionati sul medesimo asse, in modo che la direzione della trasmissione dell'impulso sia perpendicolare alle superfici stesse.

Nel metodo di trasmissione superficiale, o indiretto, martello ed accelerometro sono posizionati sulla stessa superficie e si eseguono misure con punti di emissione e ricezione del segnale posti lungo una linea retta, verticale, orizzontale o diagonale.

Infine, nella trasmissione semidiretta, i punti di emissione e ricezione del segnale appartengono a facce adiacenti, ma in alcuni casi anche opposte.

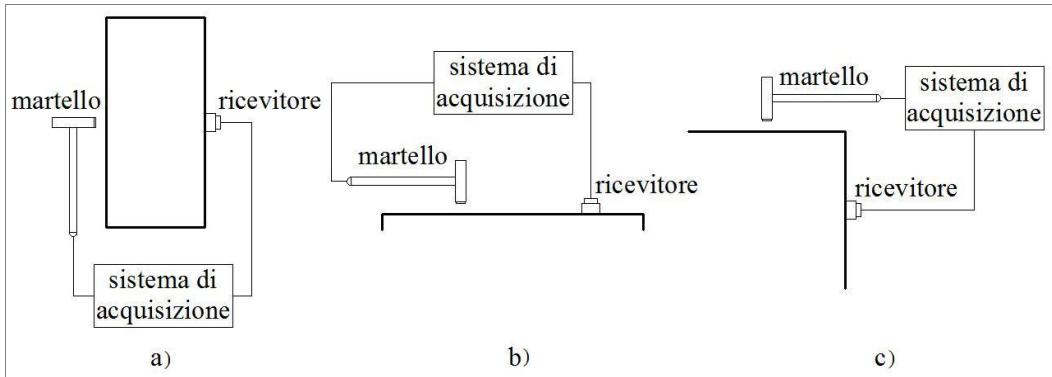


Fig. 1.1– Procedure di indagini soniche applicate alla Ghirlandina: a) diretta, b) superficiale, c) semidiretta.

L’analisi dei dati consiste nel calcolo della velocità di propagazione dell’onda, dopo aver misurato il tempo impiegato dall’impulso per coprire la distanza fra le stazioni di emissione e di ricezione del segnale sonico.

L’uso delle prove soniche nella valutazione delle strutture murarie ha come scopi la qualificazione della muratura attraverso il confronto dei risultati conseguiti con la morfologia della sezione e l’individuazione di possibili vuoti, difetti, fessure e danneggiamenti.

La strumentazione utilizzata aveva le seguenti caratteristiche:

- emittente: martello strumentato PCB 086 con punta di berillio;
- ricevente: accelerometro DYTRAN 3100A, accoppiato alla superficie in esame mediante plastilina;
- centralina di amplificazione National Instruments NI PXI – 1042Q;
- software specifico, creato in ambiente LABVIEW.

La caratterizzazione delle murature della torre tramite l’applicazione di prove soniche ha avuto lo scopo di individuare, avendo coscienza delle fasi costruttive della torre e dei materiali impiegati, lotti omogenei della muratura in cui possano essere valutate le caratteristiche meccaniche necessarie ai fini delle analisi di tipo strutturale. La campagna di indagini soniche ha avuto inizio nel giugno del 2009 e si è articolata secondo nove giornate di lavoro nei mesi di giugno e luglio, nel corso delle quali sono state eseguite prove in modalità superficiale, semidiretta e diretta lungo la quasi totalità dell’altezza della torre, fino alla quota di circa 76 metri dal piano campagna. Sono state acquisite oltre 1500 singole misure, distribuite in circa 160 posizioni di prova.

A seguito di un’attenta ispezione visuale della morfologia del manufatto, sono state individuate le possibili posizioni di prova in funzione dell’accessibilità degli spazi e delle strutture, della presenza di pareti intonacate o affrescate, di buche ponte e di porte, finestre e feritoie utili al passaggio dei cavi della strumentazione per l’acquisizione dei dati in varie modalità di prova. Per ciascuno degli ambienti della torre, che sono stati idealmente individuati attraverso le sezioni orizzontali alle diverse quote, una volta stabilita la o le pareti di prova, la distribuzione delle stazioni di prova, l’ingombro totale ed il passo delle griglie dei punti di misura, a maglia quadrata o rettangolare, sono state accuratamente segnate le griglie sulla superficie delle pareti, tenendo eventualmente conto di irregolarità e anomalie locali delle superfici murarie.

Dopodichè le aree di prova con le griglie di misura e le loro dimensioni di ingombro sono state riportate in eidotipi. Un esempio è fornito in Fig 1.2, per un pilastro a quota +20 m nel fusto della torre.

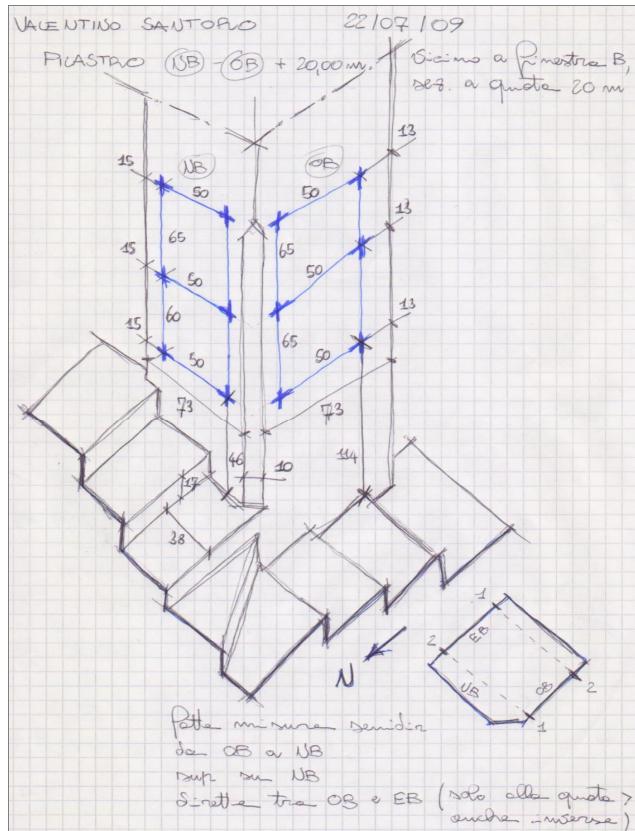


Fig. 1.2 – Eidotipo realizzato in cantiere in corrispondenza delle posizioni di prova sonica NB e OB sul pilastro di N-O alla quota +20,00 m, dove sono stati acquisiti dati sia in trasmissione superficiale, sia diretta.

Nel seguito si riportano le posizioni e direzioni di prova alle varie quote della torre, distinguendo in legenda il tipo di prova sonica. Alle piante nelle varie quote di prova seguono la documentazione fotografica e i disegni di dettaglio.

Ogni posizione di prova è indicata con una sigla in cui:

- la prima lettera (N, S, E, O) indica l'orientamento della parete, individuato dal punto cardinale;
- la seconda lettera (A, B, C, ...) indica la posizione progressiva di acquisizione a ciascuna quota considerata nelle ispezioni strumentali;
- “est” significa che le prove sono state eseguite su una parete esterna.

Piano interrato, -2,79m

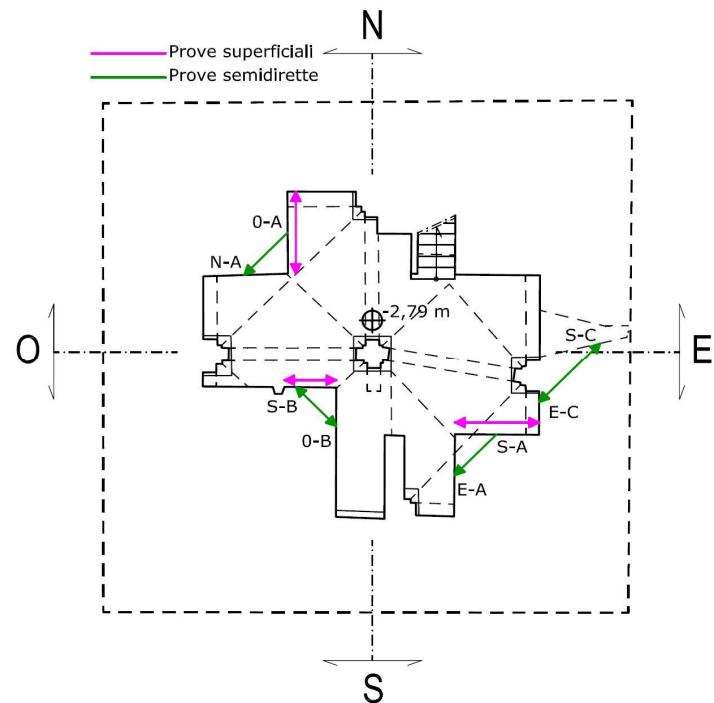


Fig. 1.3 – Quota -2,79m, pianta del piano interrato: pareti indagate e tipo di prove soniche.



Fig. 1.4 – Foto del piano interrato in direzione Est.

Posizioni di prova NA, OA, pianta a quota -2,79m

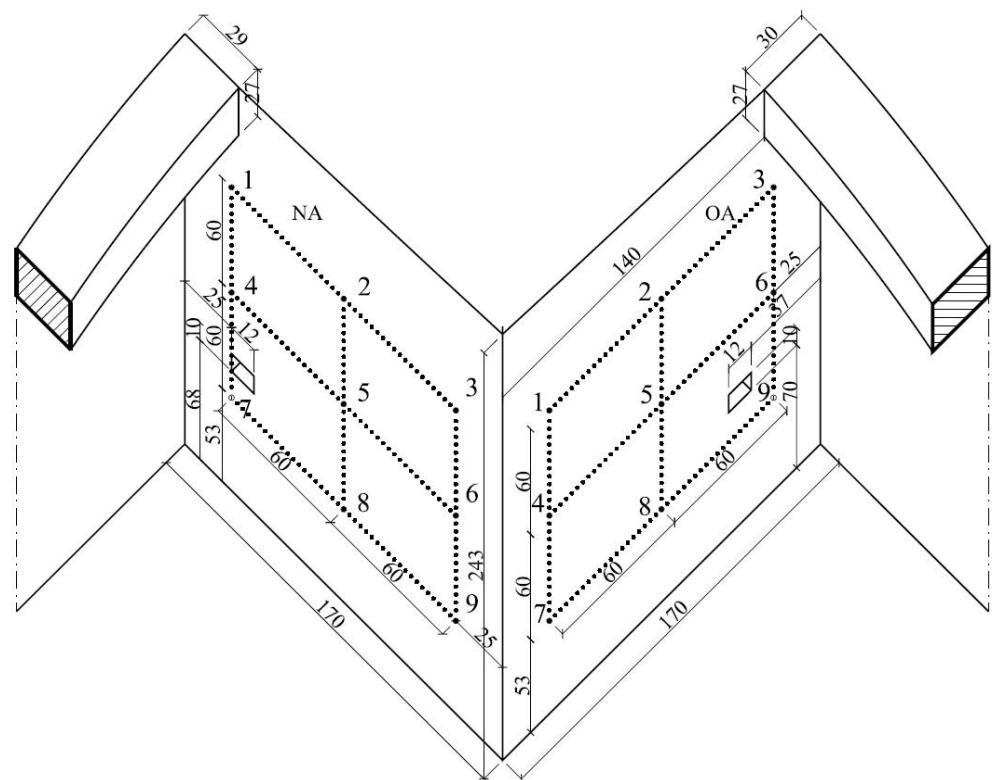
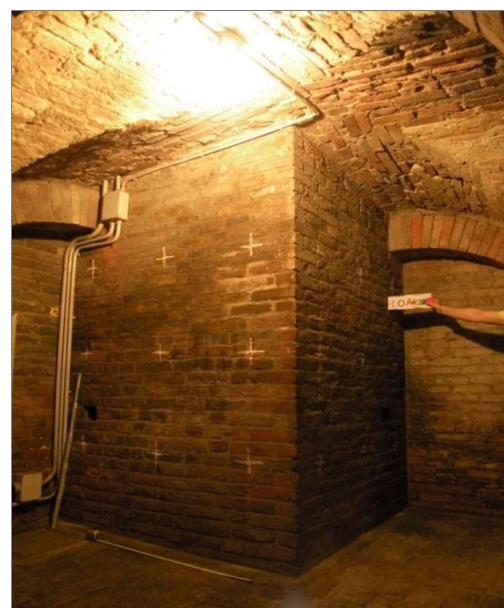


Fig. 1.5 – Restituzione grafica delle posizioni di prova NA e OA.



a)



b)

Fig. 1.6 – Foto delle posizioni di prova: a) NA; b) vista assonometrica con indicazione della parete OA.

Posizioni di prova OB, SB, pianta a quota -2,79m

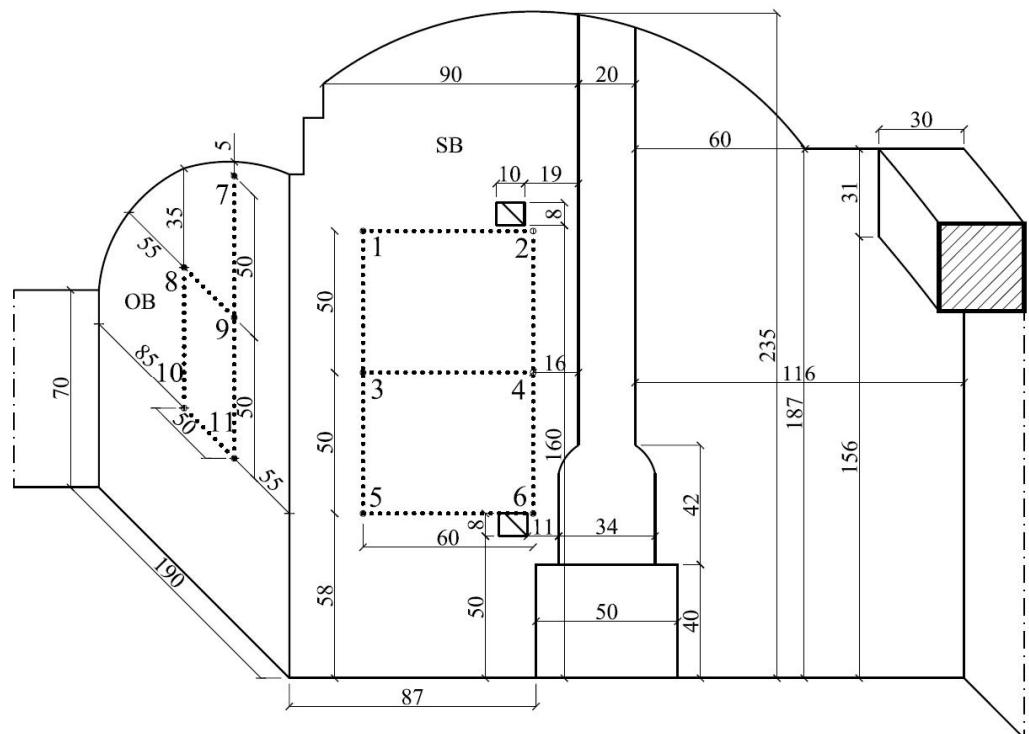


Fig. 1.7 – Restituzione grafica delle posizioni di prova OB e SB.



Fig. 1.8 – Foto delle posizioni di prova: a) OB; b) SB.

Posizioni di prova SA, EA, pianta a quota -2,79m

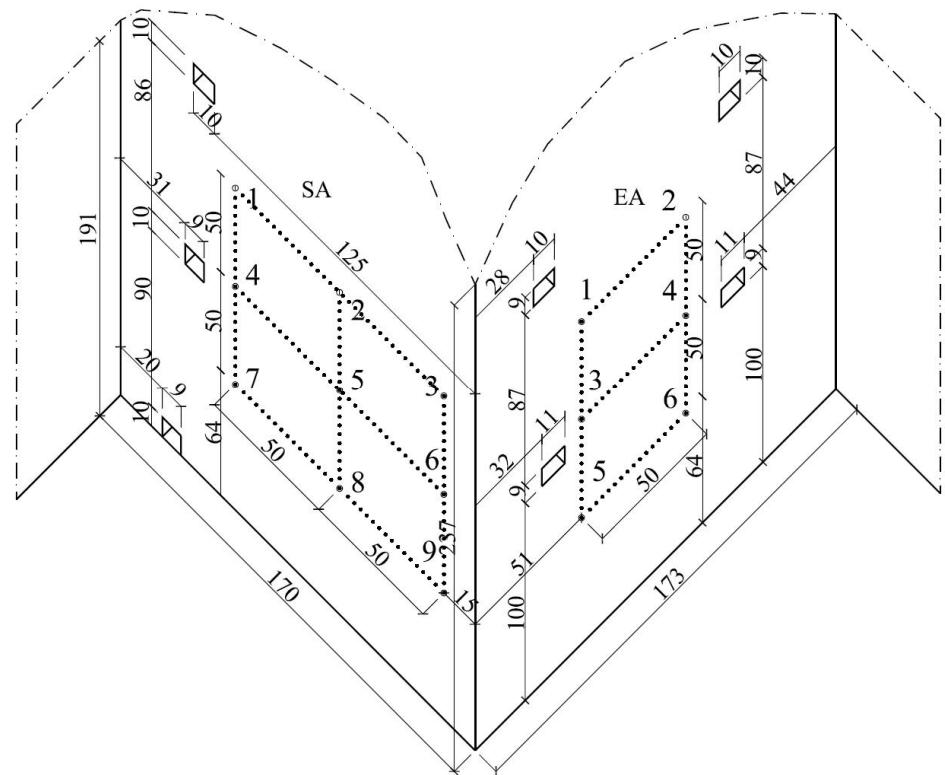


Fig. 1.9 – Restituzione grafica delle posizioni di prova SA e EA.



a)



b)

Fig. 1.10 – Foto delle posizioni di prova: a) SA; b) EA.

Posizioni di prova SC, EC, pianta a quota -2,79m

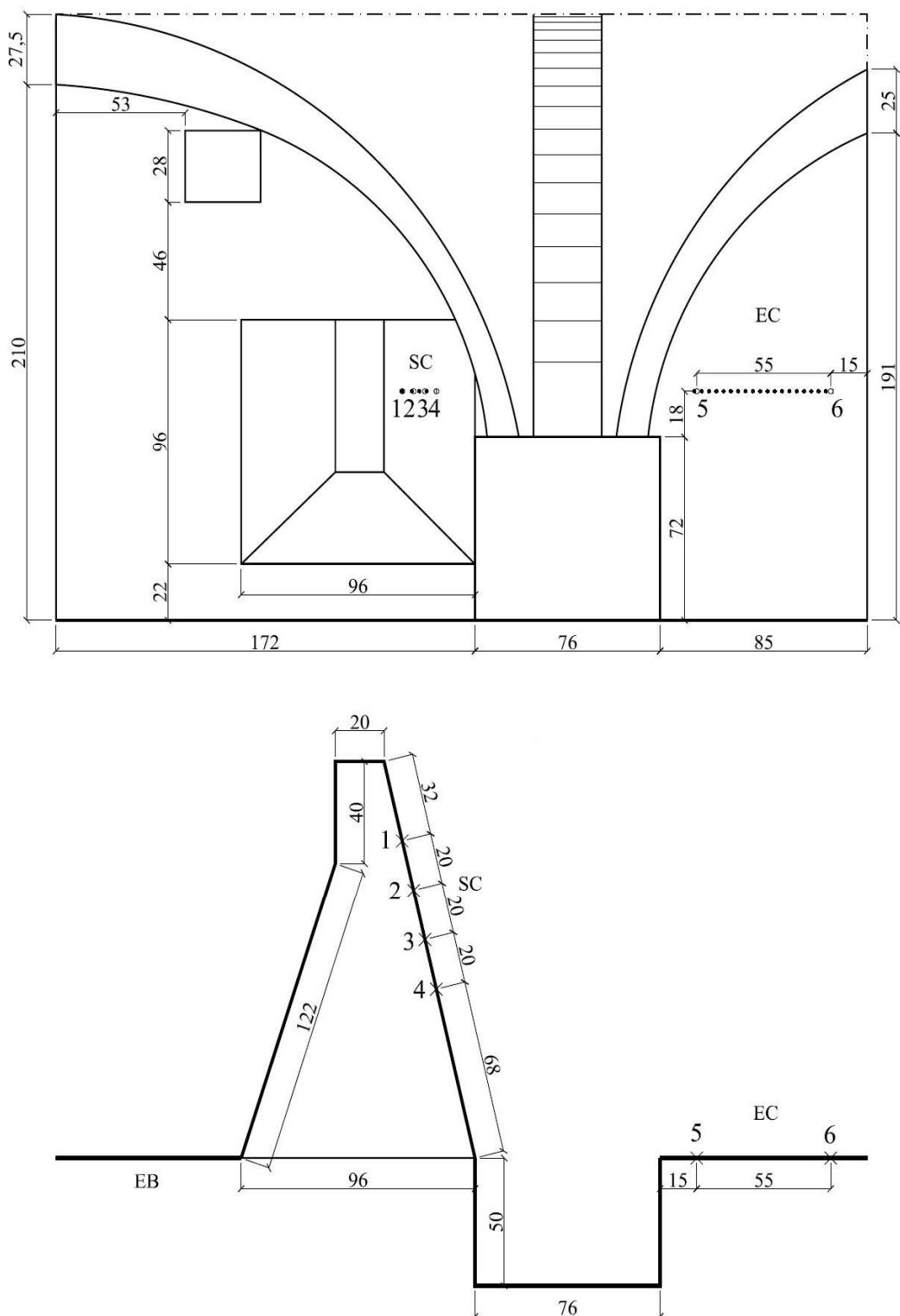


Fig. 1.11 – Restituzione grafica delle posizioni di prova SC e EC.



a)



b)

Fig. 1.12– Foto delle posizioni di prova: a) SC; b) EC.

Piano terra, 0,00m

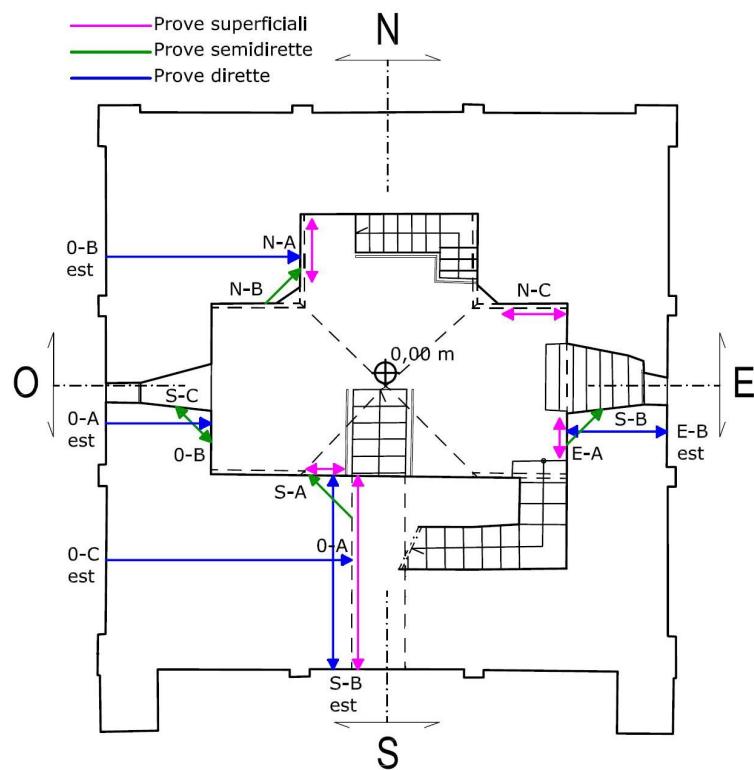


Fig. 1.13 – Quota 0,00m, pianta del piano terra: pareti indagate e tipo di prove soniche.



Fig. 1.14 – Foto del piano terra in direzione Ovest.

Posizioni di prova OA, SA, SBest, OCest, pianta a quota 0,00m

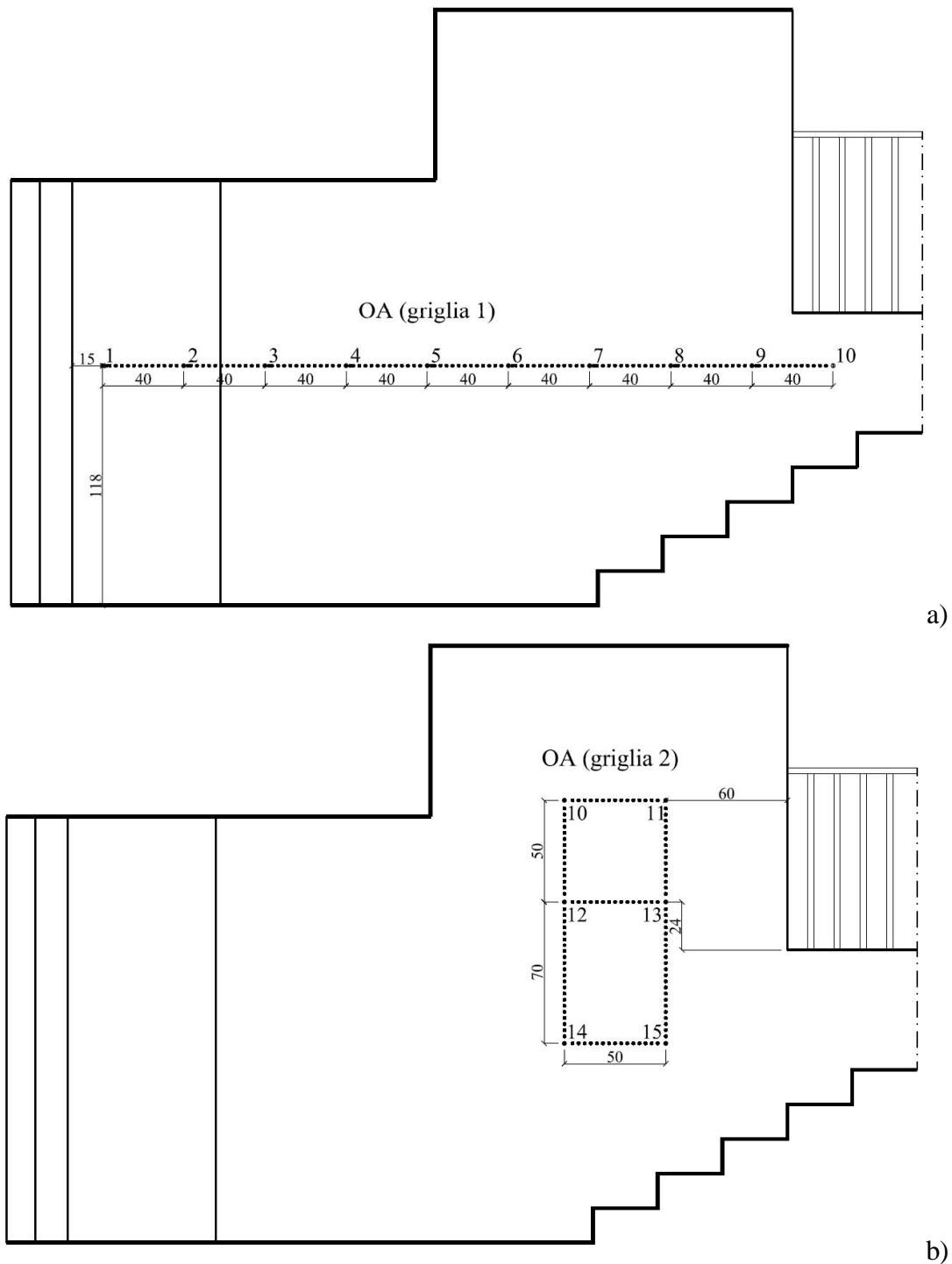


Fig. 1.15 – Restituzione grafica della posizione di prova OA:
a) griglia 1; b) griglia 2.



a)



b)

Fig. 1.16 – Foto della posizione di prova OA: a) griglia 1; b) griglia 2.

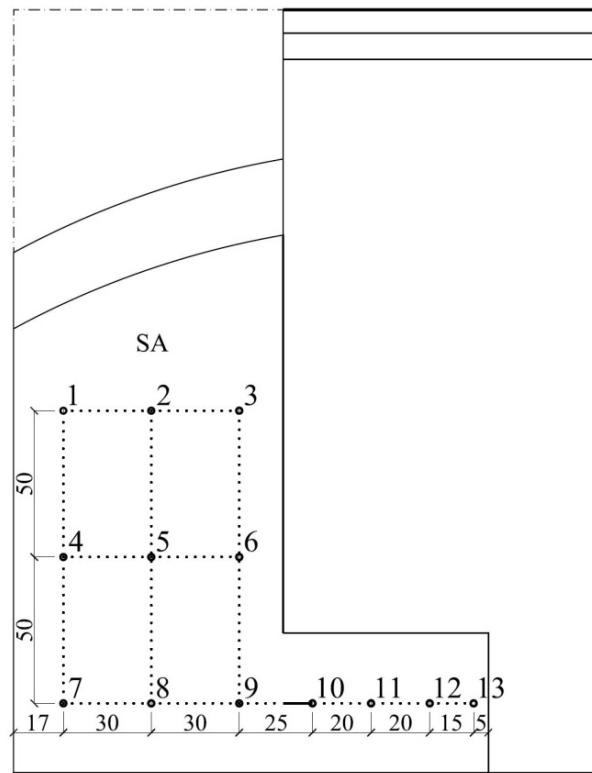


Fig. 1.17 – Restituzione grafica della posizione di prova SA.



Fig. 1.18 – Foto della posizione di prova SA.

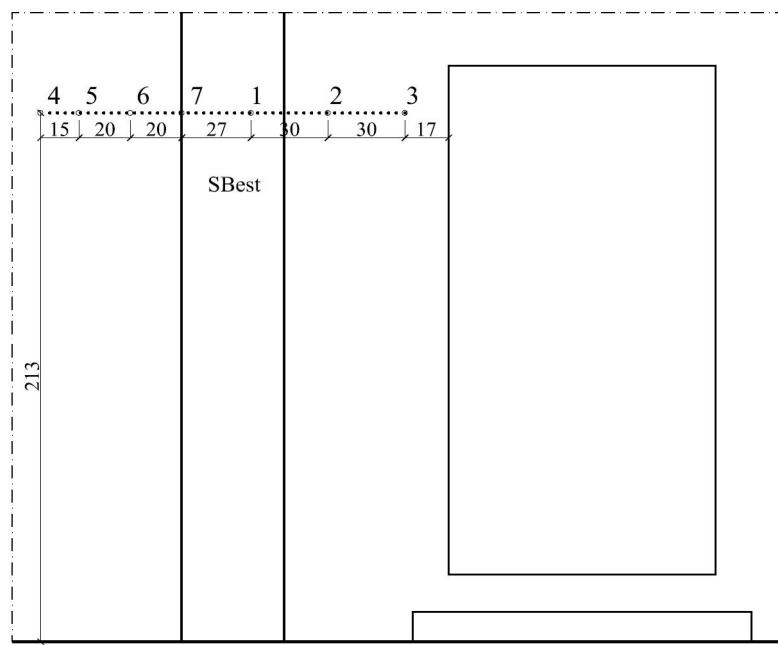


Fig. 1.19 – Restituzione grafica della posizione di prova SBest.



Fig. 1.20 – Foto della posizione di prova SBest.

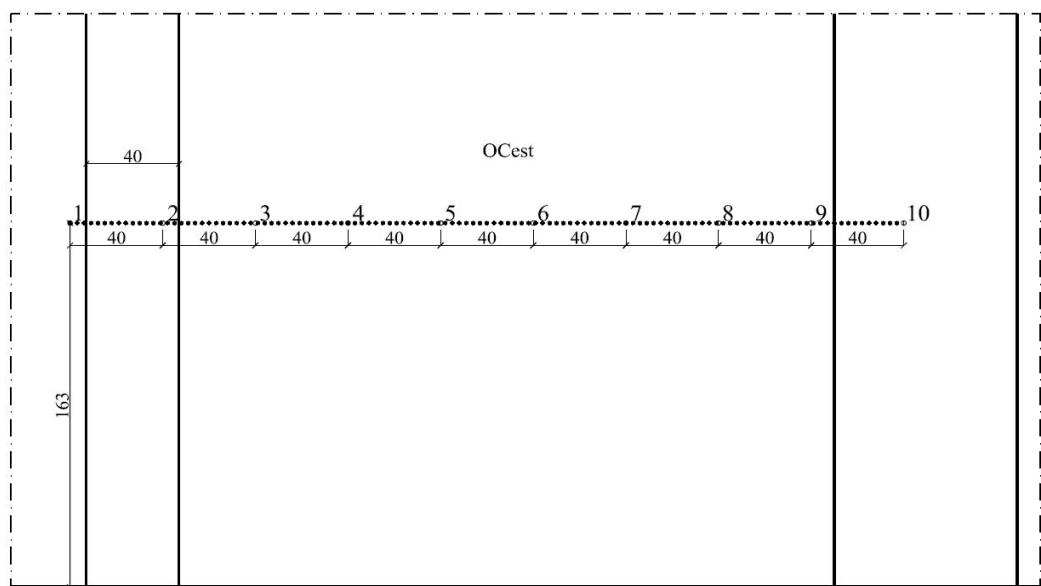


Fig. 1.21– Restituzione grafica della posizione di prova OCest.



Fig. 1.22 – Foto della posizione di prova OCest.

Posizioni di prova OB, SC, OAest, pianta a quota 0,00m

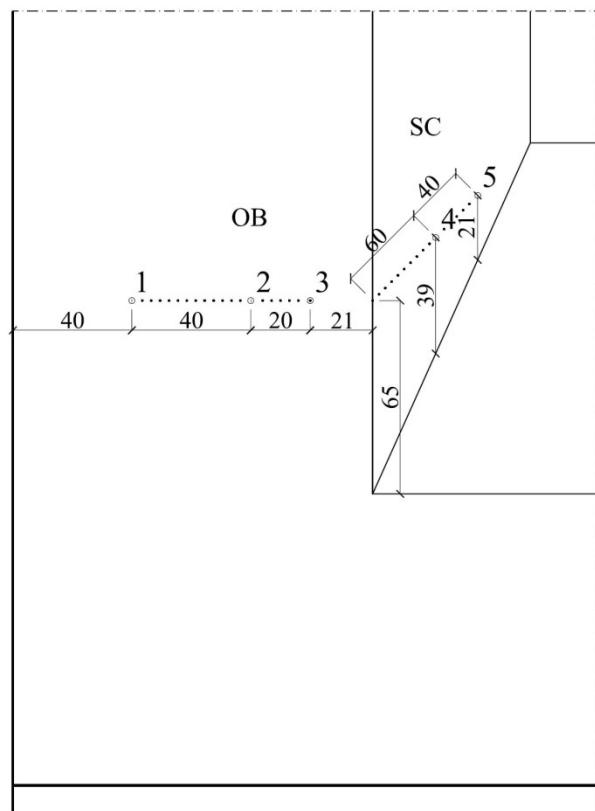


Fig. 1.23 – Restituzione grafica delle posizioni di prova OB, SC.



Fig. 1.24 – Foto delle posizioni di prova OB, SC.

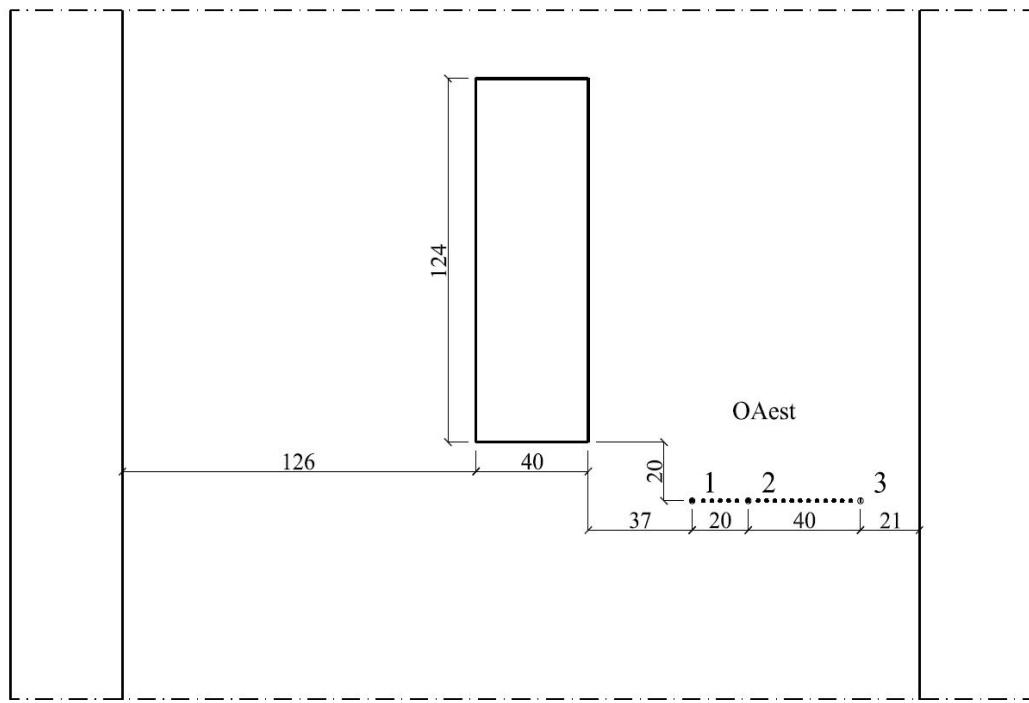


Fig. 1.25 – Restituzione grafica della posizione di prova OAest.



Fig. 1.26 – Foto della posizione di prova OAest.

Posizioni di prova NA, NB, OBest, pianta a quota 0,00m

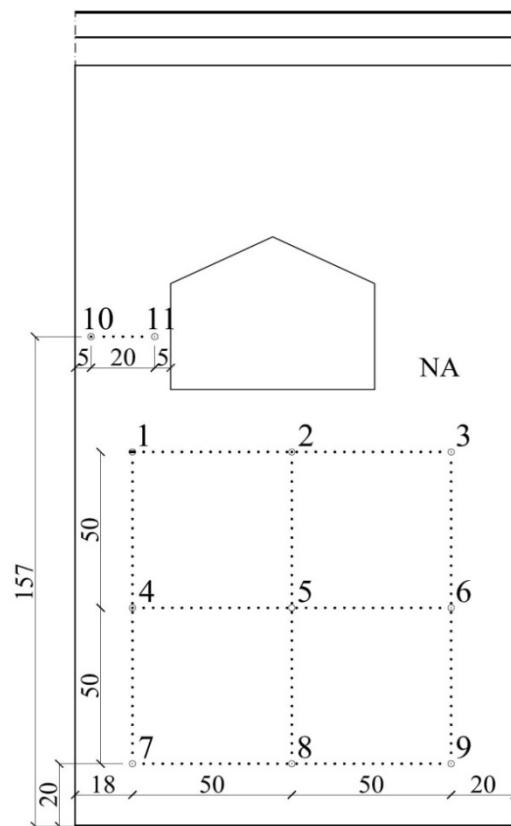


Fig. 1.27 – Restituzione grafica della posizione di prova NA.



Fig. 1.28 – Foto della posizione di prova NA.

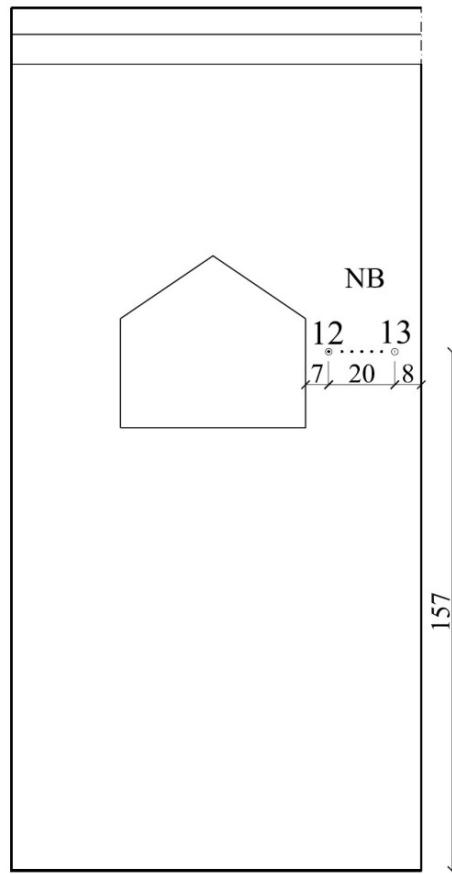


Fig. 1.29 – Restituzione grafica della posizione di prova NB.



Fig. 1.30 – Foto della posizione di prova NB.

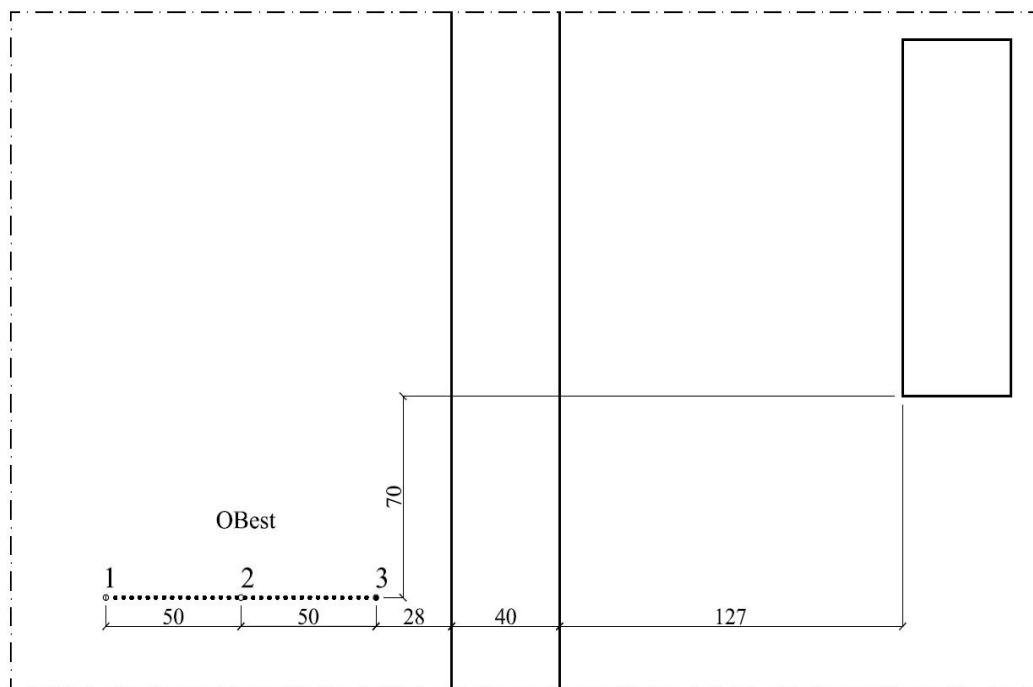


Fig. 1.31 – Restituzione grafica della posizione di prova OBest.



Fig. 1.32 – Foto della posizione di prova OBest.

Posizione di prova NC, pianta a quota 0,00m

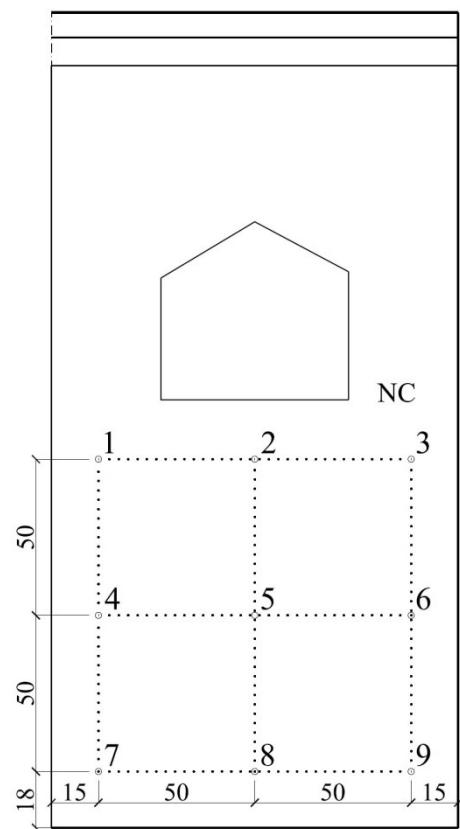


Fig. 1.33 – Restituzione grafica della posizione di prova NC.



Fig. 1.34 – Foto della posizione di prova NC.

Posizioni di prova EA, SB, EBest, pianta a quota 0,00m

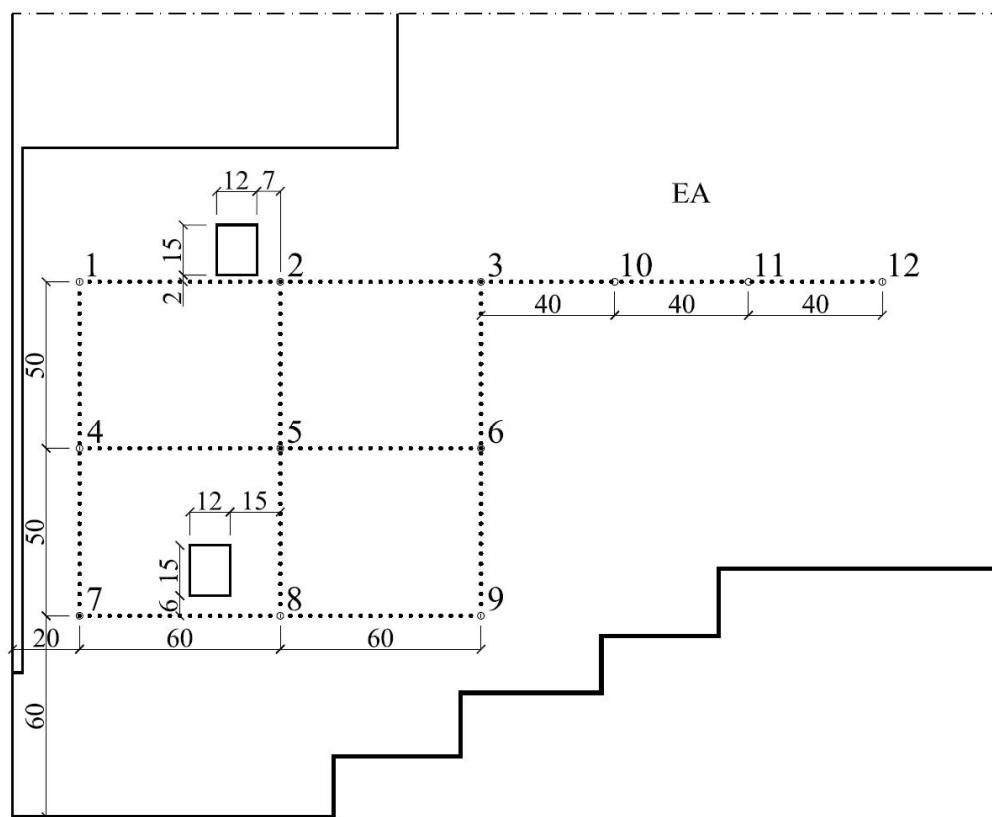


Fig. 1.35 – Restituzione grafica della posizione di prova EA.



Fig. 1.36 – Foto della posizione di prova EA.

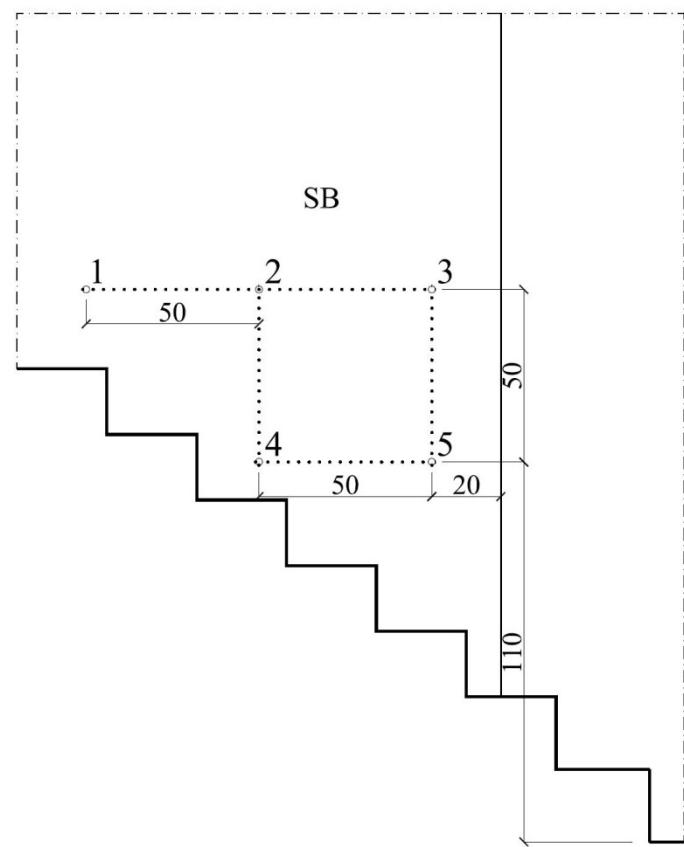


Fig. 1.37 – Restituzione grafica della posizione di prova SB.



Fig. 1.38 – Foto della posizione di prova SB.

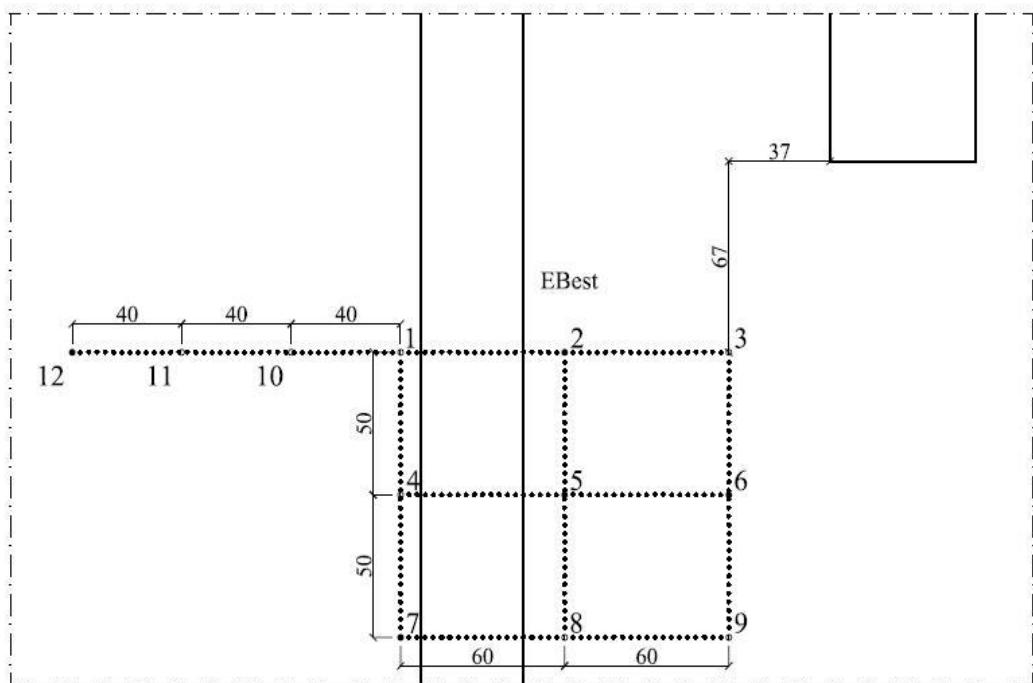


Fig. 1.39 – Restituzione grafica della posizione di prova EBest.



Fig. 1.40 – Foto della posizione di prova EBest.

Piano uno, 3,44m

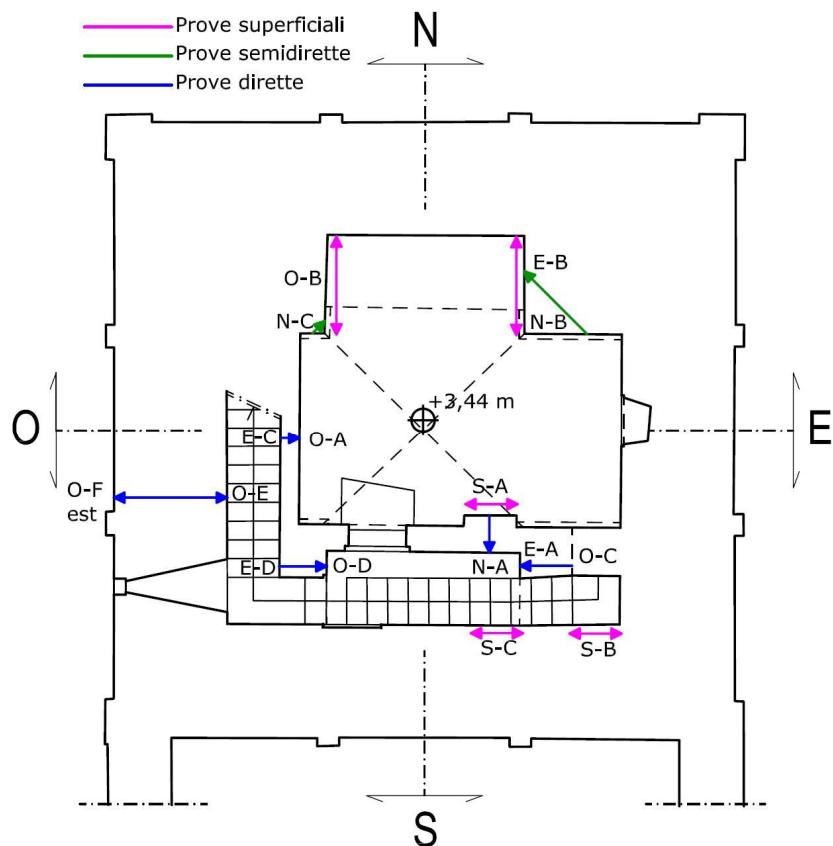


Fig.1.41 – Quota +3,44m, pianta del piano uno: pareti indagate e tipo di prove soniche.



Fig. 1.42 – a) Elaborazione dello schizzo della parete OB; b) Preparazione di alcune griglie di prova; c) Acquisizione dei dati.

Posizioni di prova OC, EA, pianta a quota 3,44m

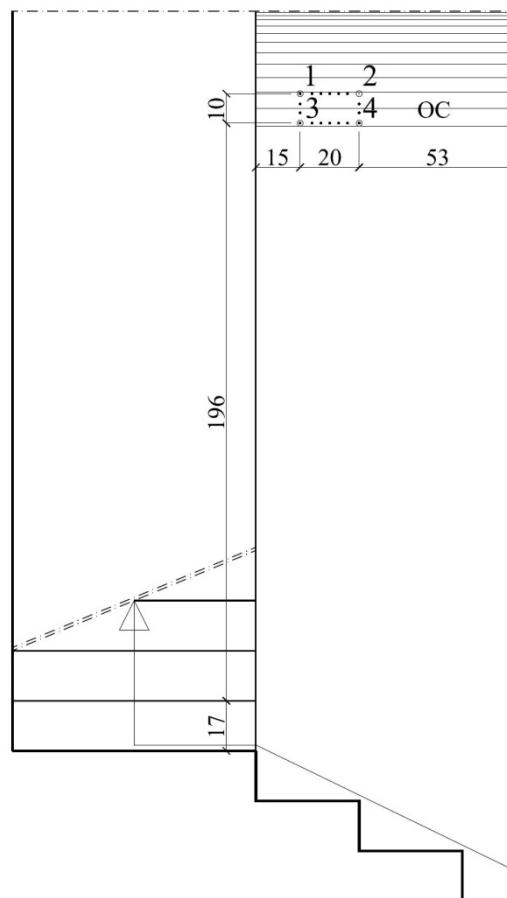


Fig. 1.43 – Restituzione grafica della posizione di prova OC.



Fig.1.44 – Foto della posizione di prova OC.

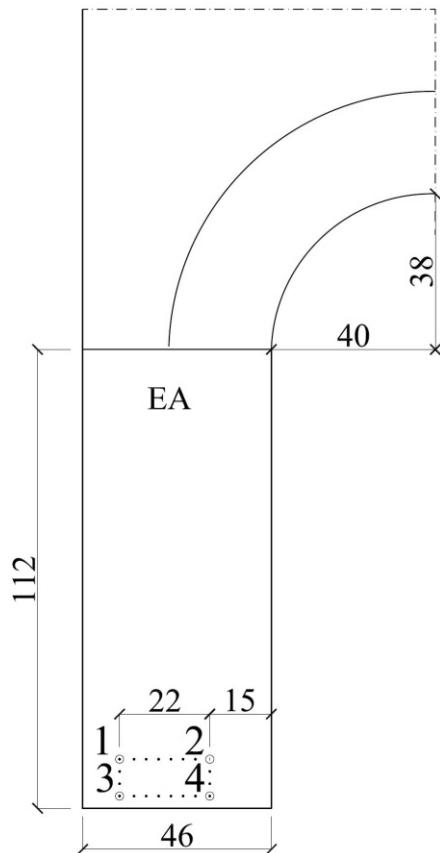


Fig. 1.45 – Restituzione grafica della parete EA.



Fig. 1.46 – Foto della parete EA.

Posizione di prova SB, pianta a quota 3,44m

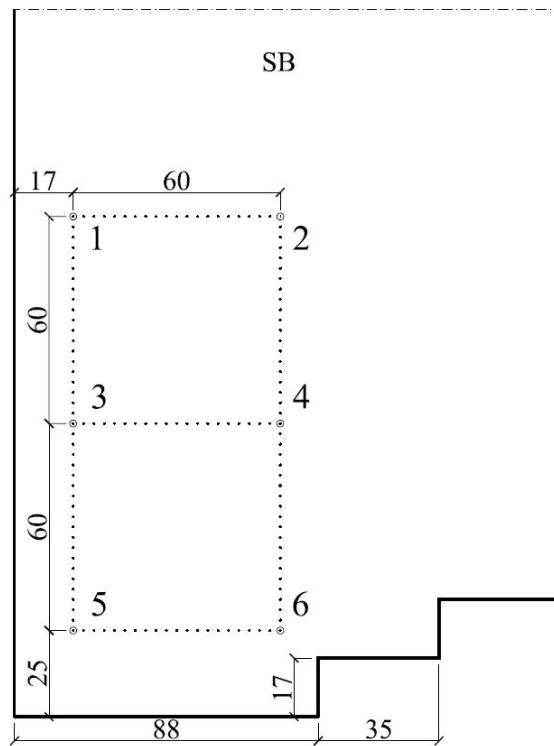


Fig. 1.47 – Restituzione grafica della posizione di prova SB.



Fig. 1.48 – Foto della posizione di prova SB.

Posizione di prova SC, pianta a quota 3,44m

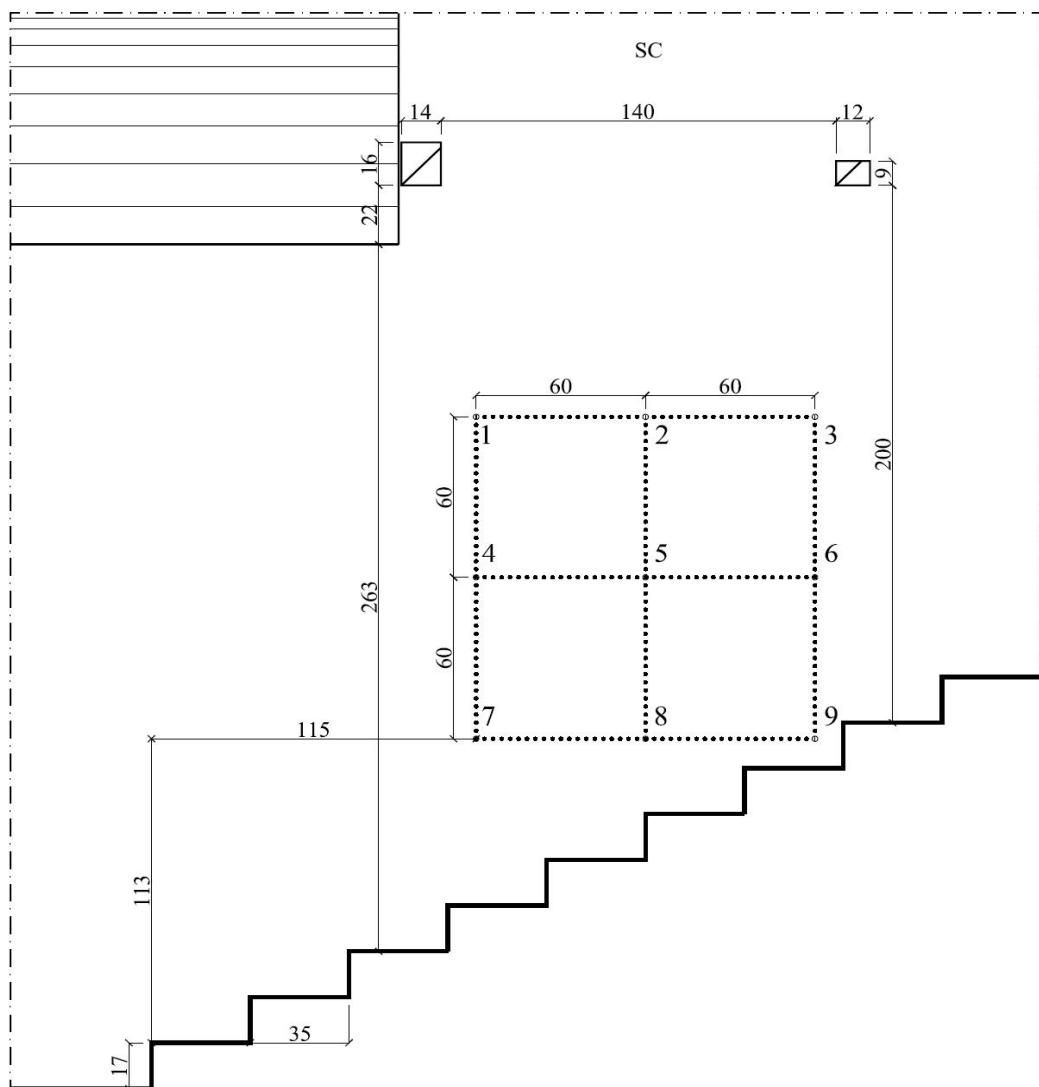


Fig. 1.49 – Restituzione grafica della posizione di prova SC.



Fig. 1.50 – Foto della posizione di prova SC.

Posizioni di prova SA, NA, pianta a quota 3,44m

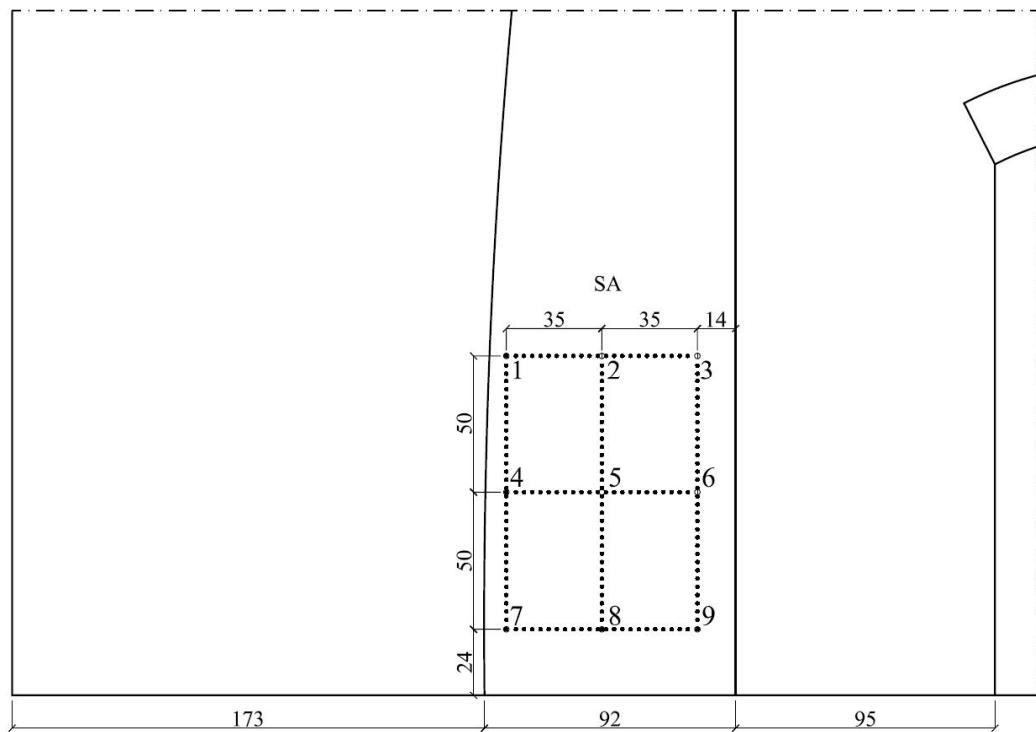


Fig. 1.51 – Restituzione grafica della posizione di prova SA.



Fig. 1.52 – Foto della posizione di prova SA.

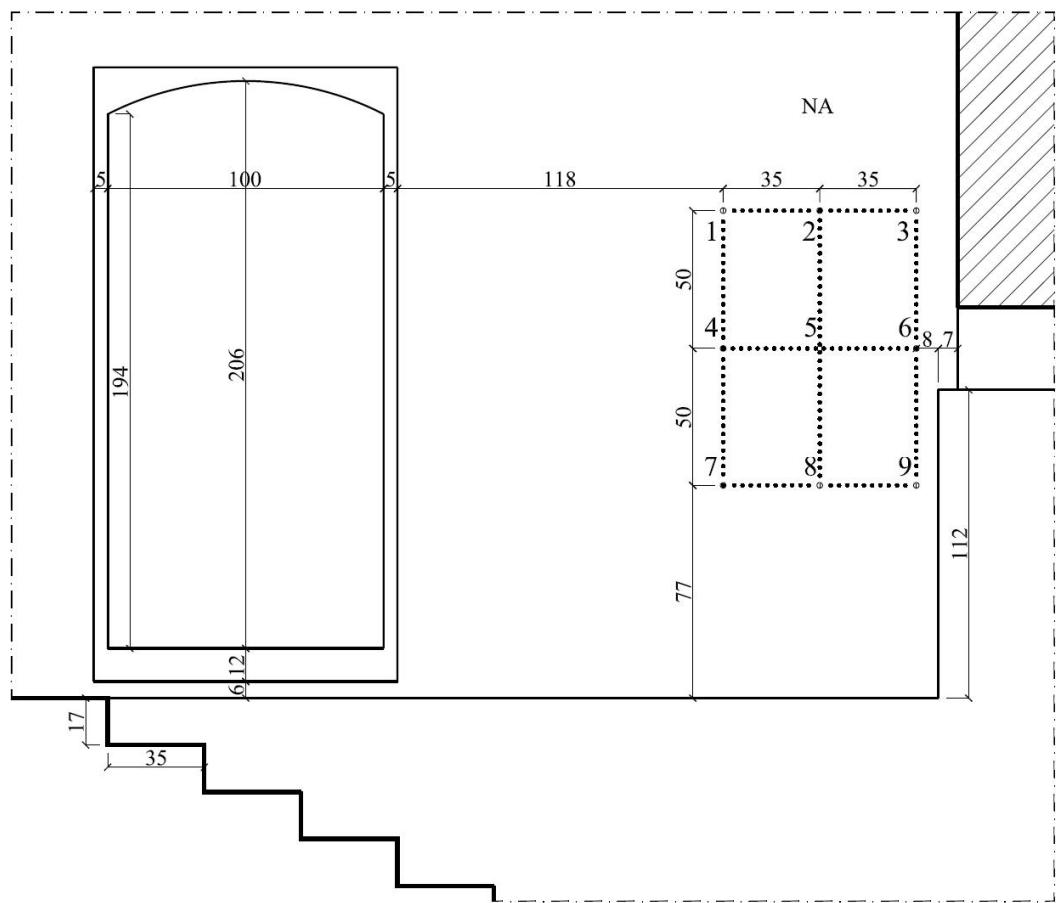


Fig. 1.53 – Restituzione grafica della parete NA.



Fig. 1.54 – Foto della parete NA.

Posizioni di prova EB, NB, pianta a quota 3,44m

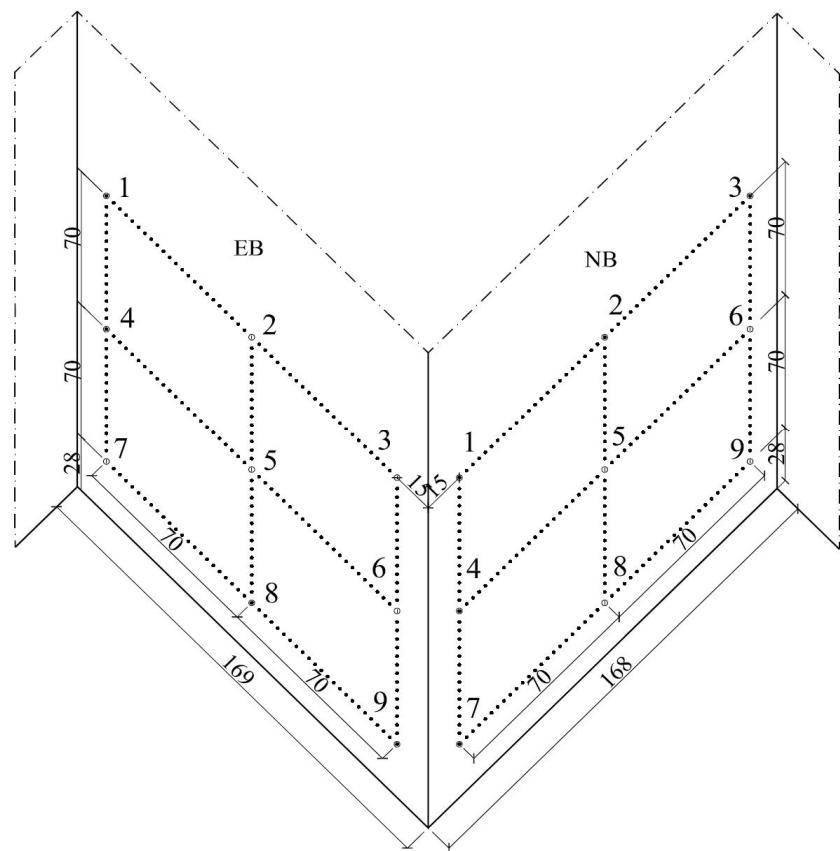


Fig. 1.55 – Restituzione grafica delle posizioni di prova EB, NB.

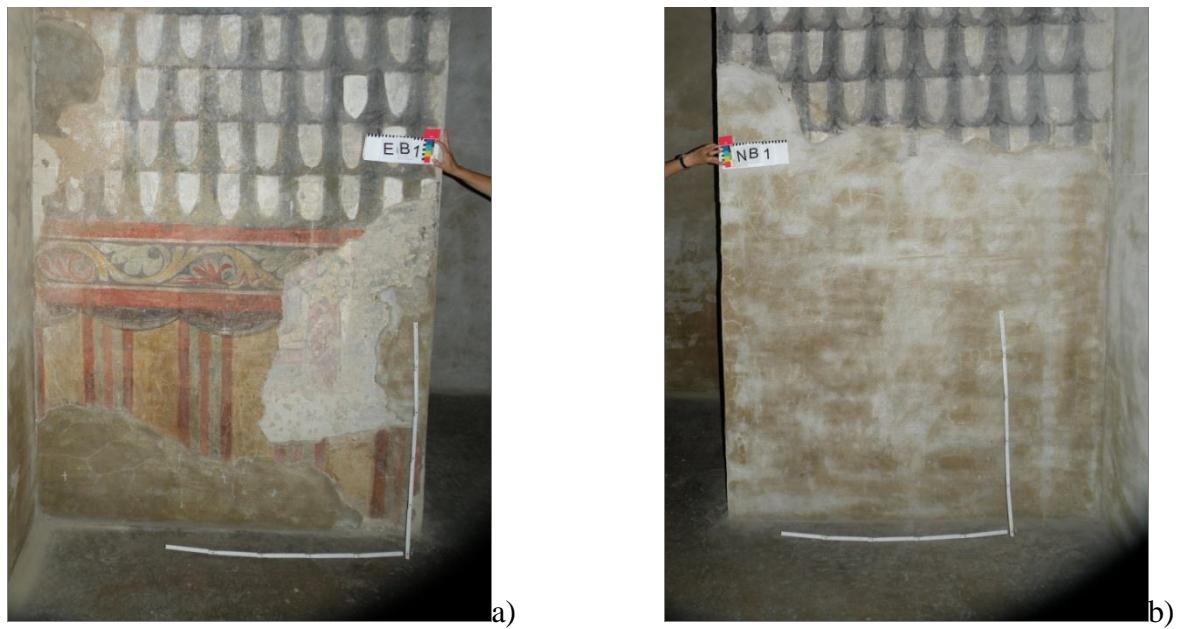


Fig. 1.56 – Foto della posizione di prova: a) EB; b) NB.

Posizioni di prova NC, OB, pianta a quota 3,44m

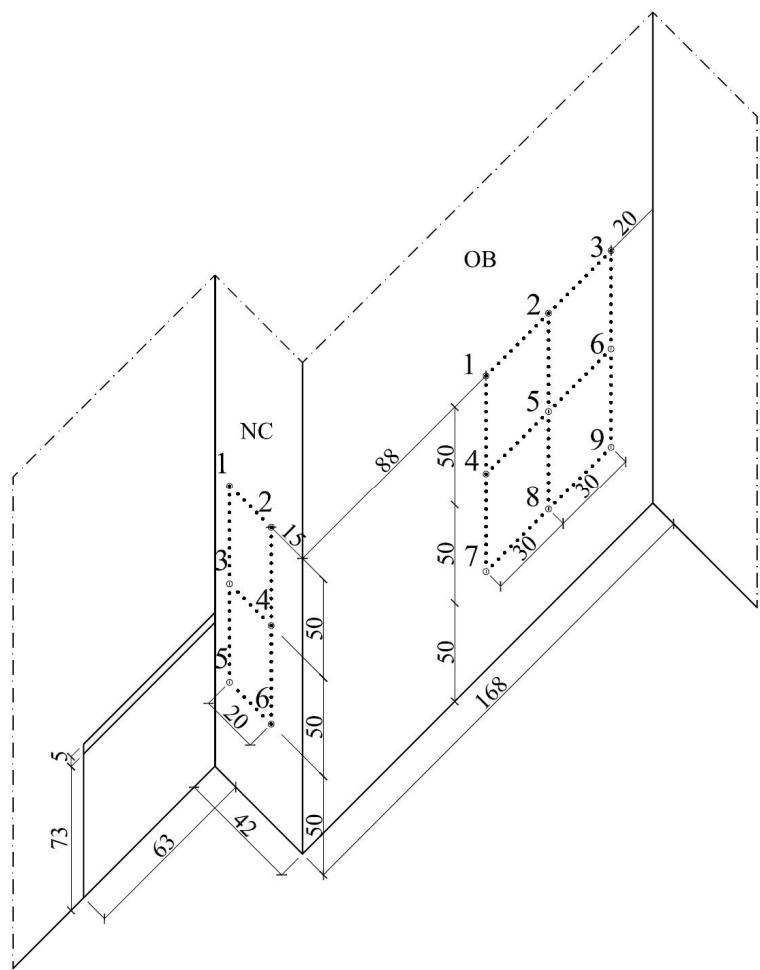


Fig. 1.57 – Restituzione grafica delle posizioni di prova NC, OB.

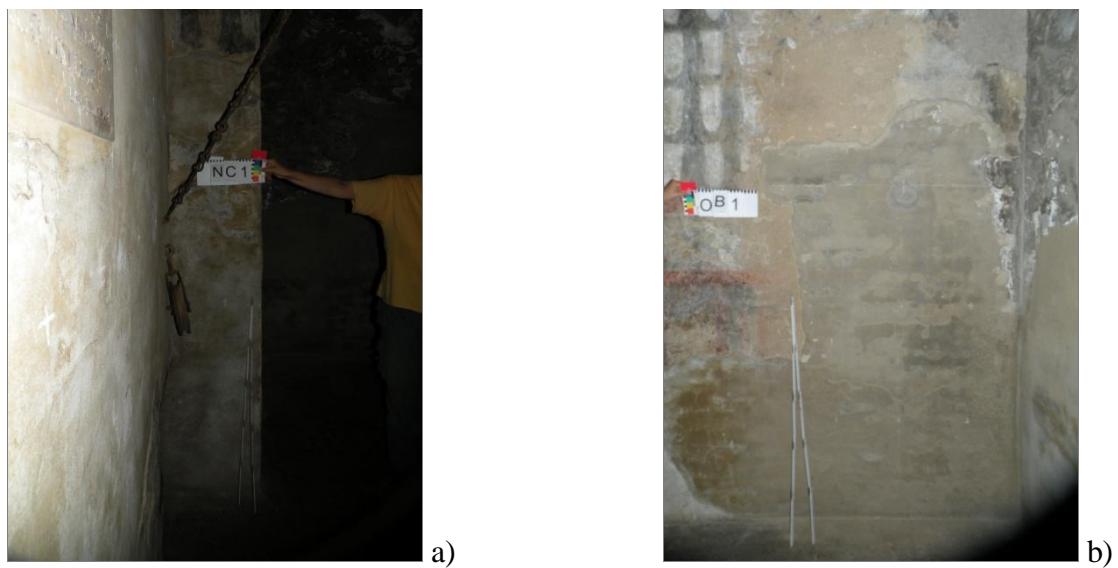


Fig. 1.58 – Foto delle posizioni di prova: a) NC; b) OB.

Posizioni di prova EC, ED, OA, OD, pianta a quota 3,44m

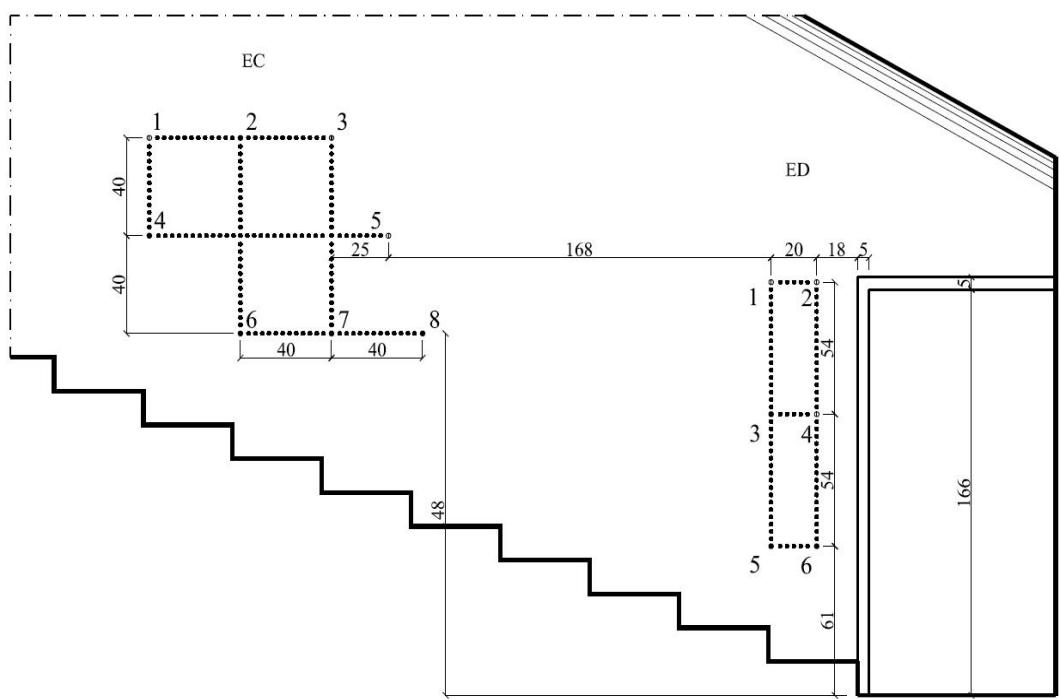


Fig. 1.59 – Restituzione grafica delle posizioni di prova EC, ED.

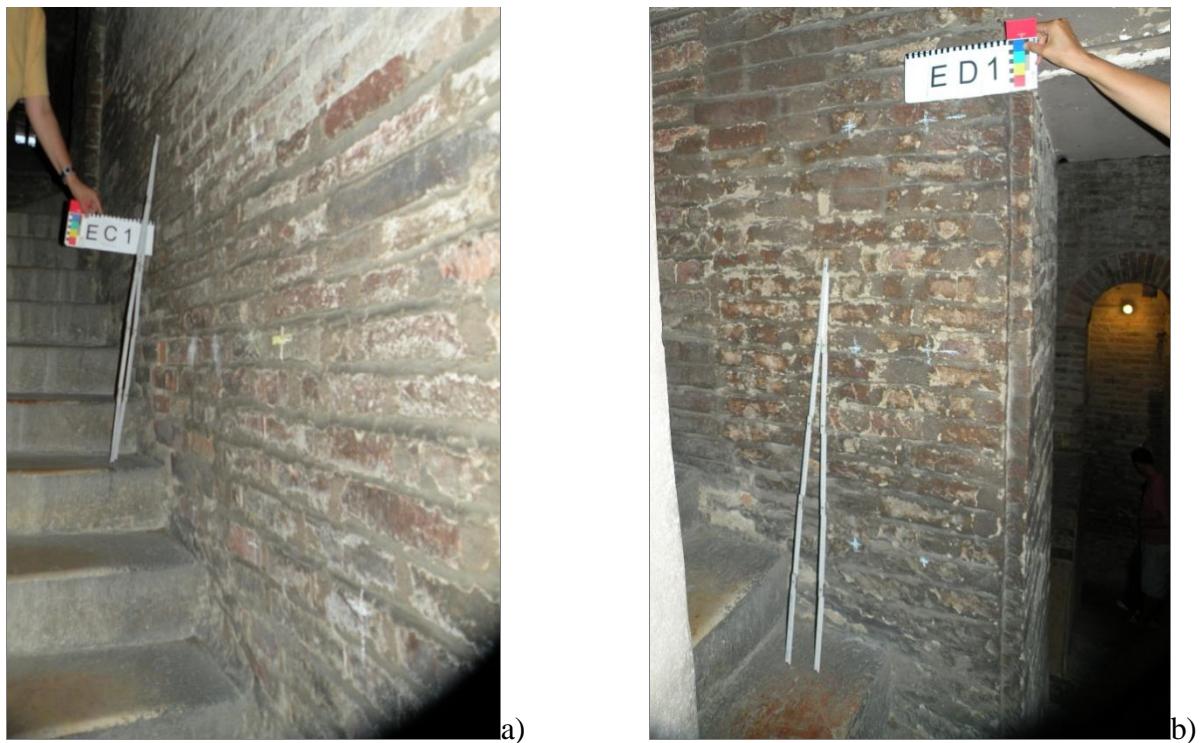


Fig. 1.60 – Foto delle posizioni di prova: a) EC; b) ED.

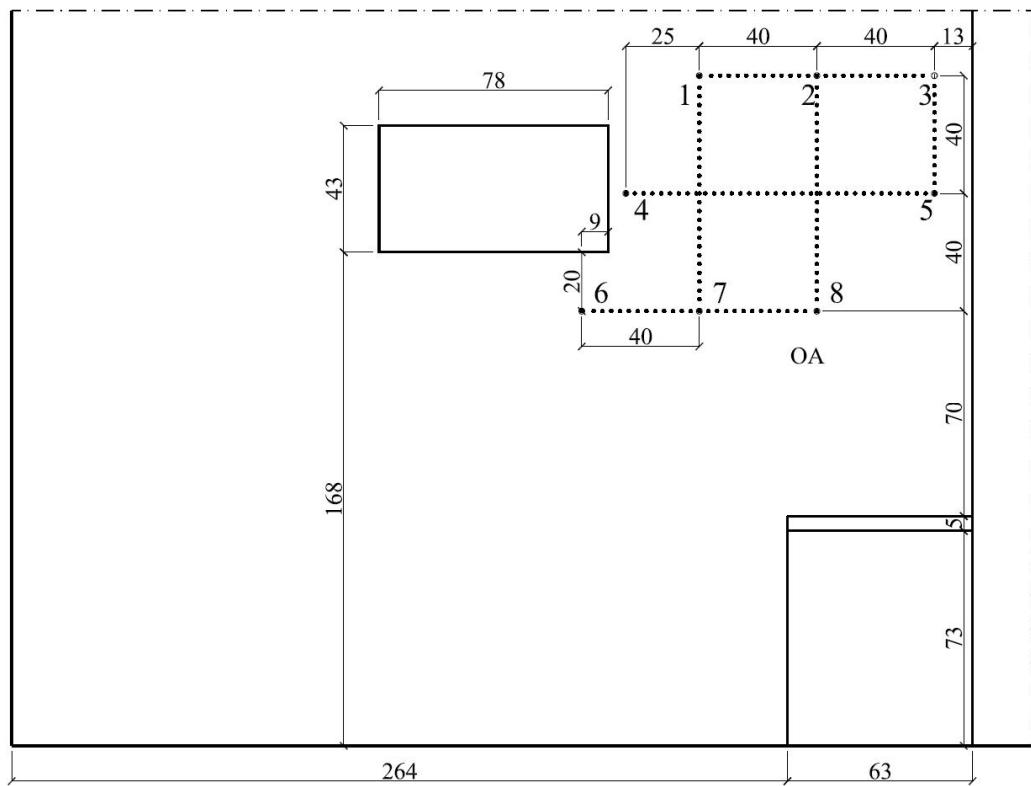


Fig. 1.61 – Restituzione grafica della parete OA.

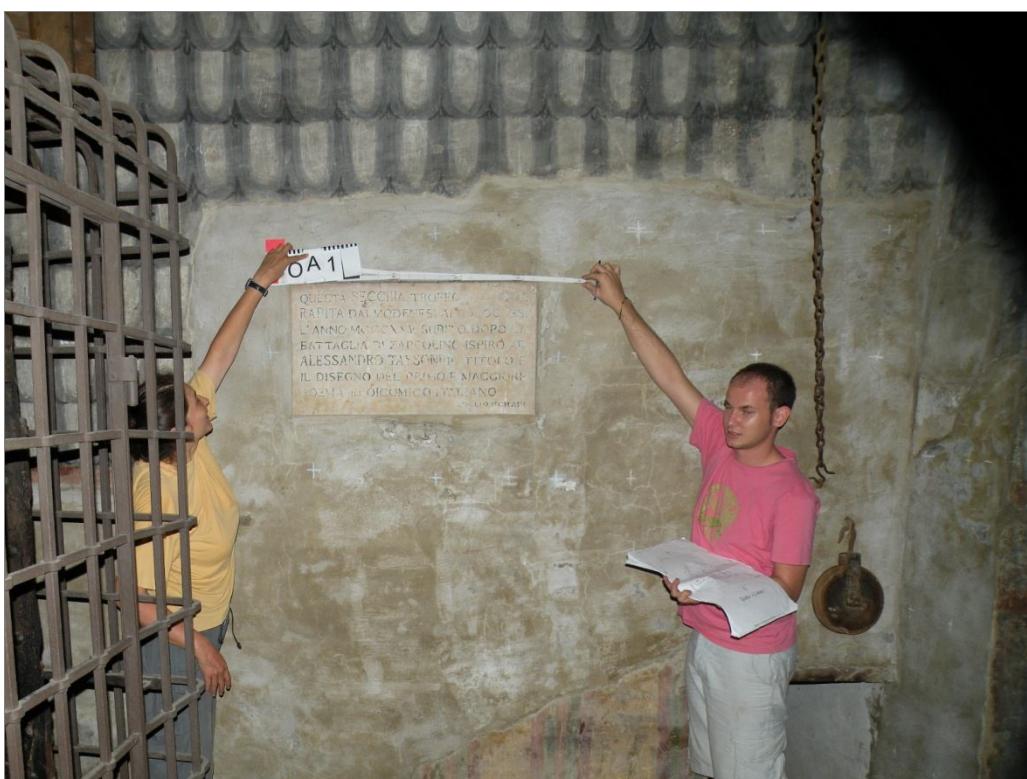


Fig. 1.62 – Foto della parete OA.

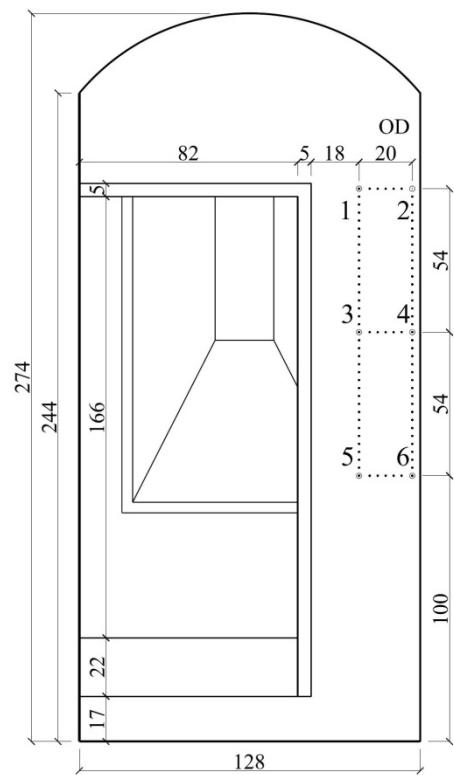


Fig. 1.63 – Restituzione grafica della parete OD.



Fig. 1.64 – Foto della parete OD.

Posizioni di prova OFest, OE, pianta a quota 3,44m

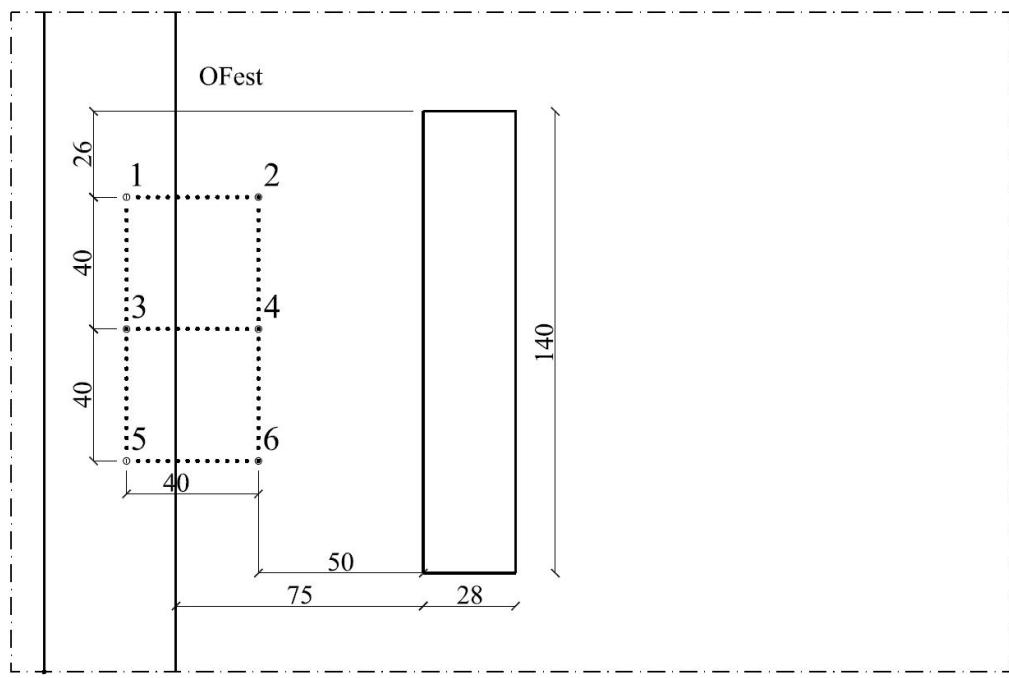


Fig. 1.65 – Restituzione grafica della posizione di prova OFest.



Fig. 1.66 – Foto della posizione di prova OFest.

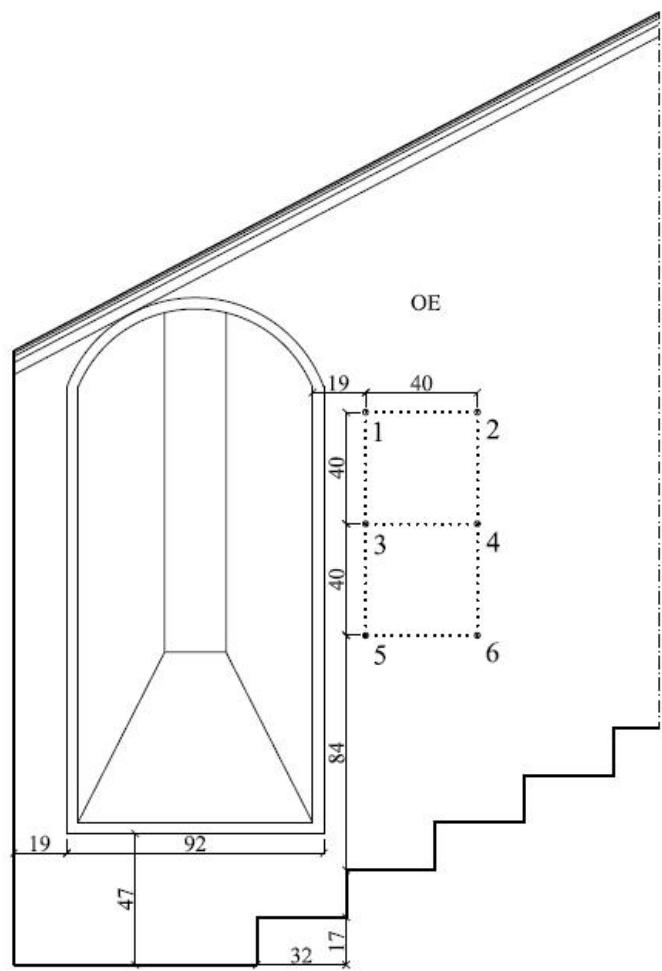


Fig. 1.67 – Restituzione grafica della posizione di prova OE.



Fig. 1.68 – Foto della posizione di prova OE.

Piano due, 9,62m

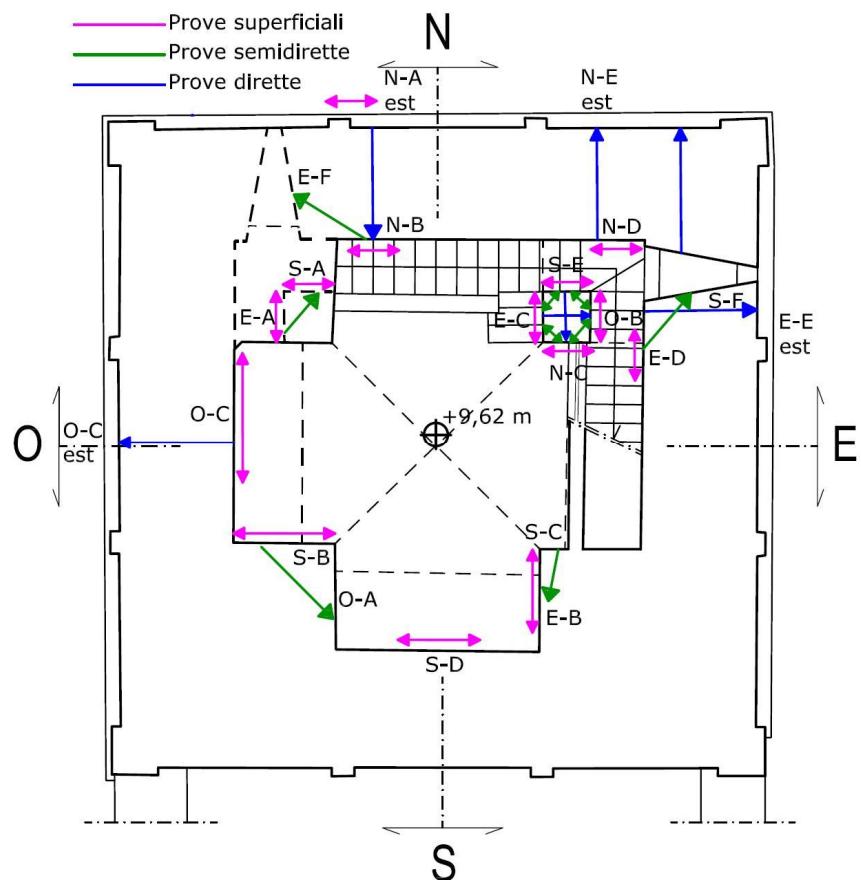


Fig. 1.69 – Quota +9,62m, pianta del piano due: pareti indagate e tipo di prove soniche.



Fig. 1.70 – Realizzazione di prove semidirette fra le pareti SB e OA.

Posizioni di prova NAest, NB, EF, pianta a quota 9,62m

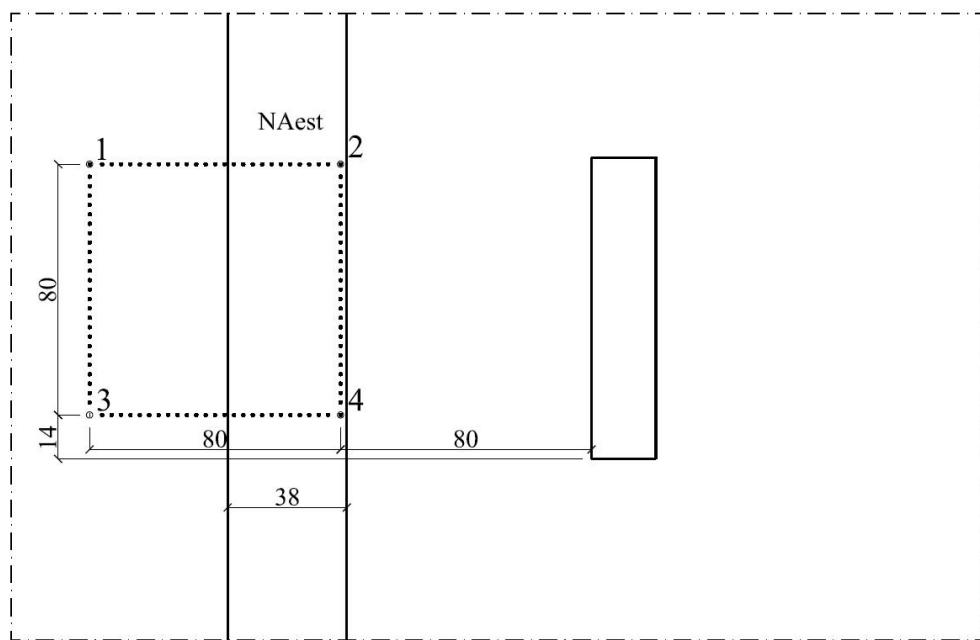


Fig. 1.71 – Restituzione grafica della posizione di prova NAest.



Fig. 1.72 – Foto della posizione di prova NAest.

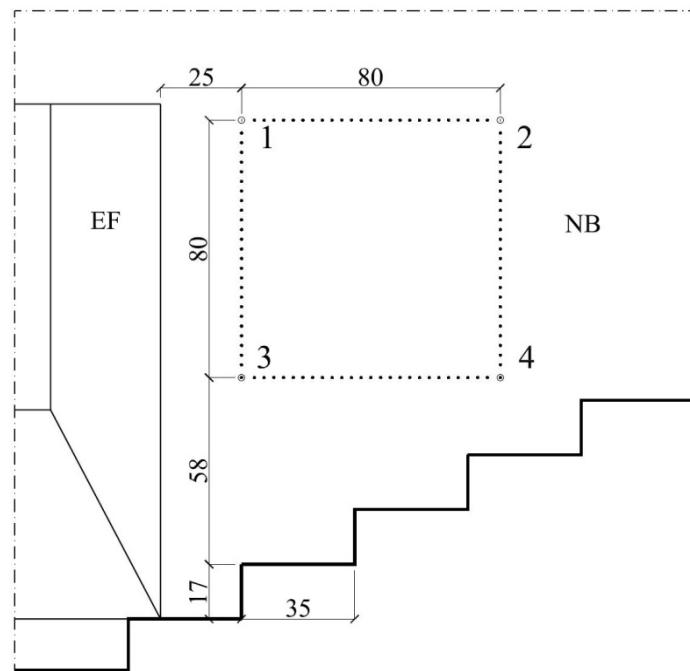


Fig. 1.73 – Restituzione grafica della posizione di prova NB.



Fig. 1.74 – Foto della posizione di prova NB.

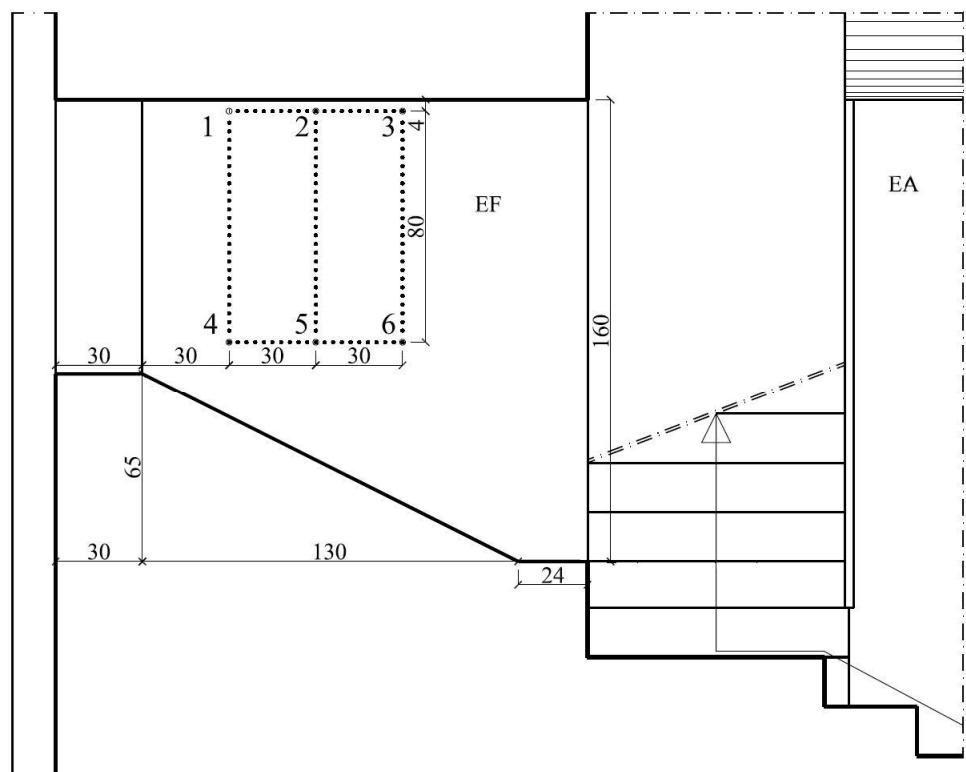


Fig. 1.75 – Restituzione grafica della posizione di prova EF.



Fig. 1.76 – Foto della posizione di prova EF.

Posizioni di prova EA, SA, pianta a quota 9,62m

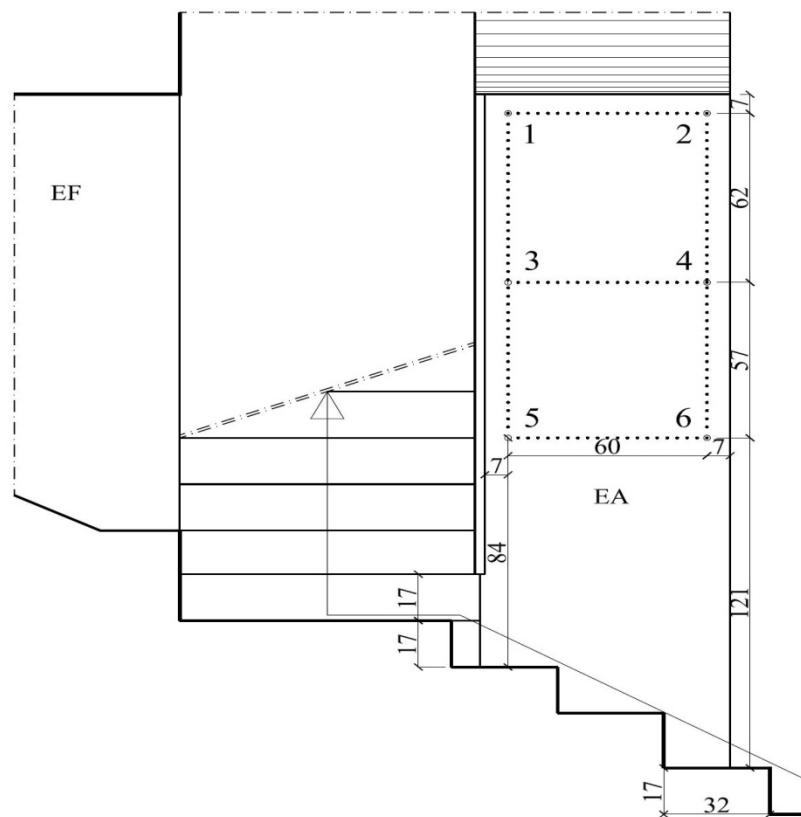


Fig. 1.77 – Restituzione grafica della posizione di prova EA.



Fig. 1.78 – Foto della posizione di prova EA.

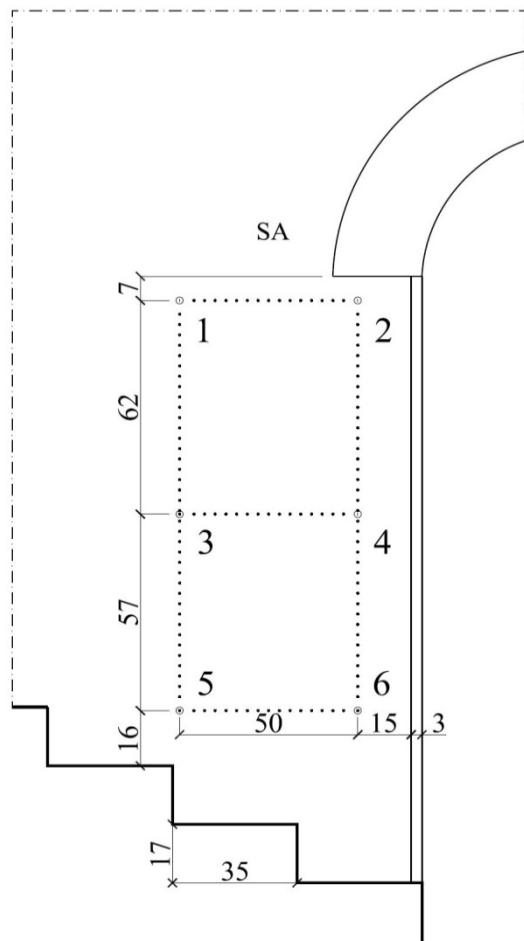


Fig. 1.79 – Restituzione grafica della posizione di prova SA.



Fig. 1.80 – Foto della posizione di prova SA.

Posizioni di prova OA, SB, pianta a quota 9,62m

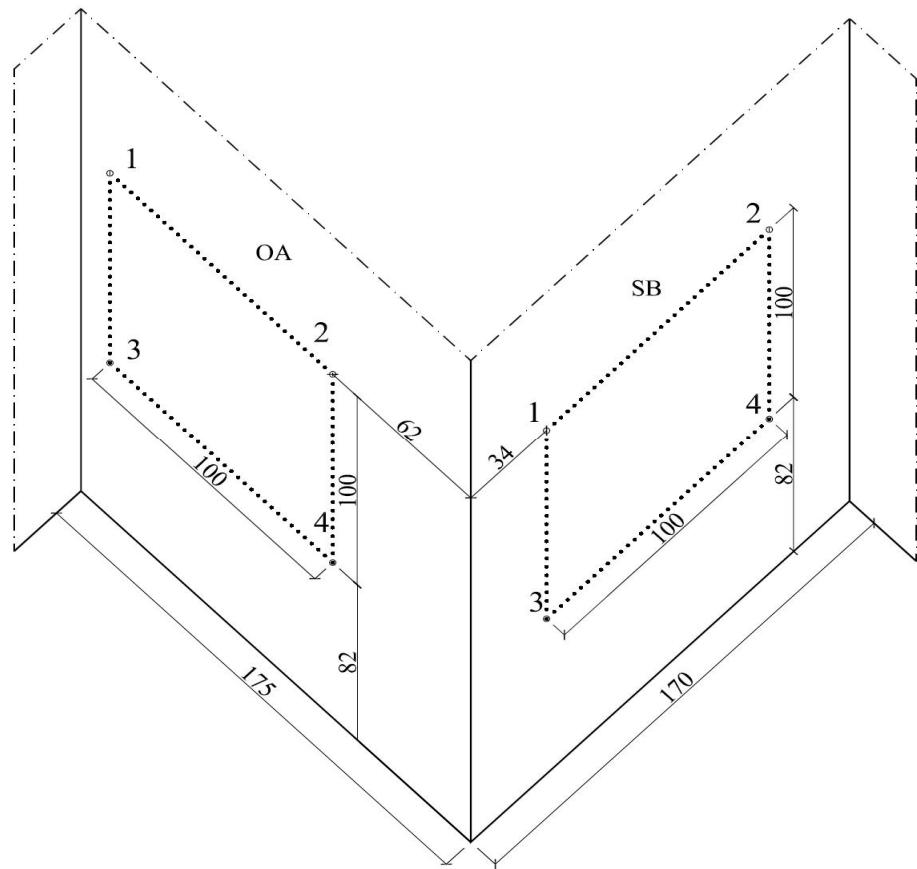


Fig. 1.81 – Restituzione grafica delle posizioni di prova OA, SB.

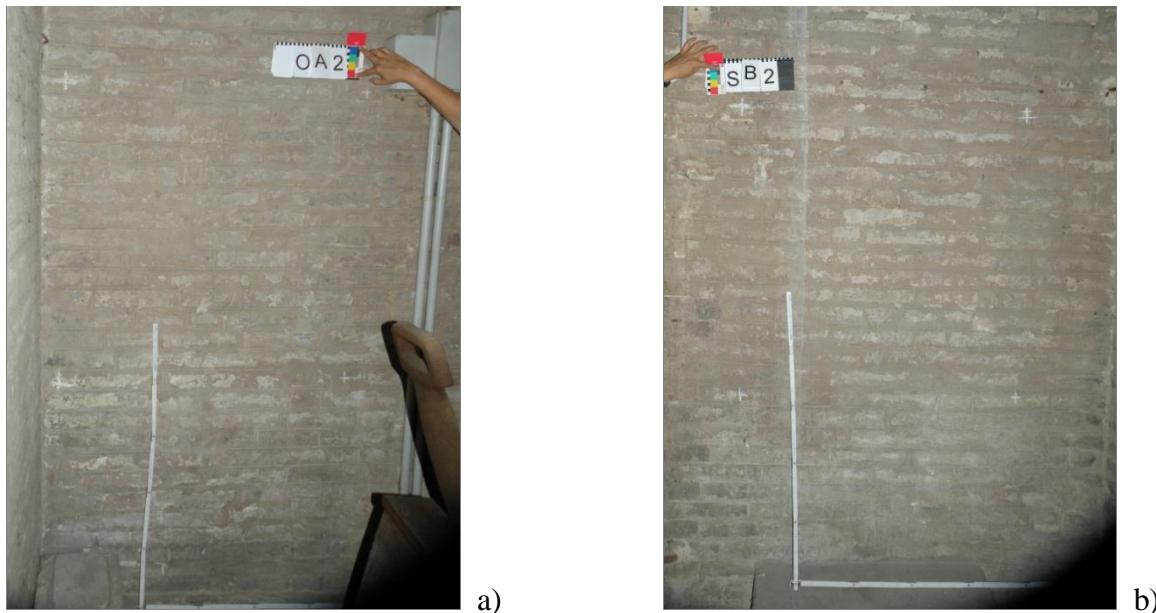


Fig. 1.82 – Foto delle posizioni di prova: a) OA; b) SB.

Posizioni di prova SC, EB, pianta a quota 9,62m

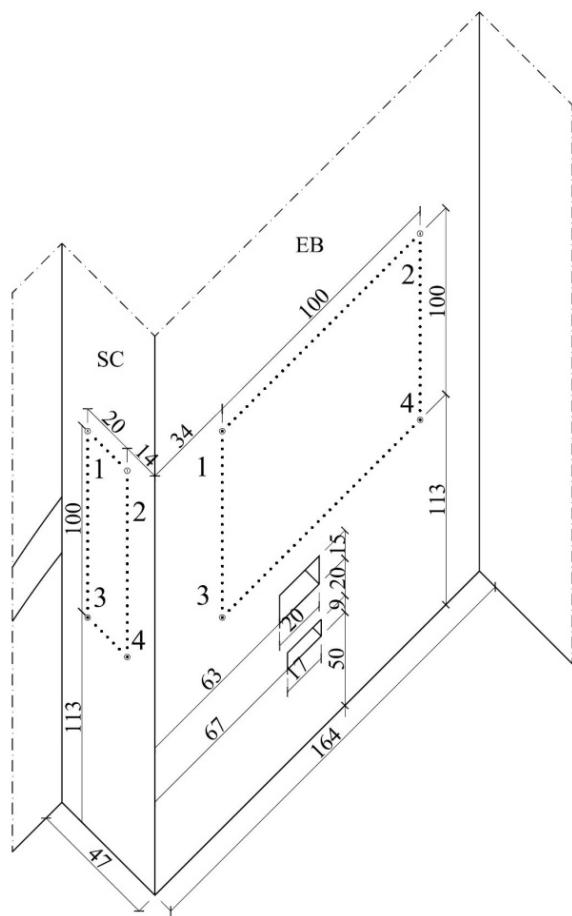


Fig. 1.83 – Restituzione grafica delle posizioni di prova SC, EB.



Fig. 1.84 – Foto delle posizioni di prova: a) SC; b) EB.

Posizione di prova SD, pianta a quota 9,62m

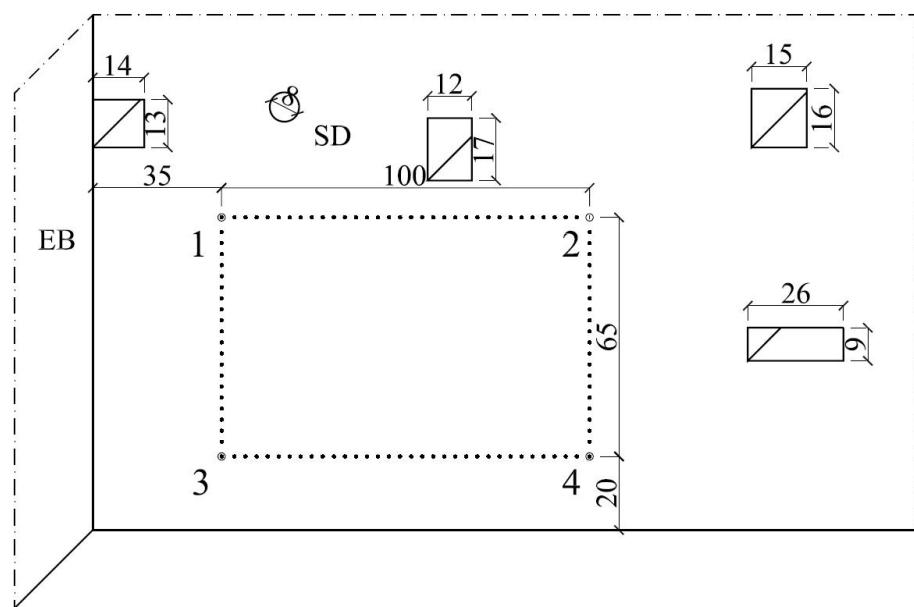


Fig.1.85 – Restituzione grafica della posizione di prova SD.



Fig. 1.86 – Foto della posizione di prova SD.

Posizioni di prova OC, OCest, pianta a quota 9,62m

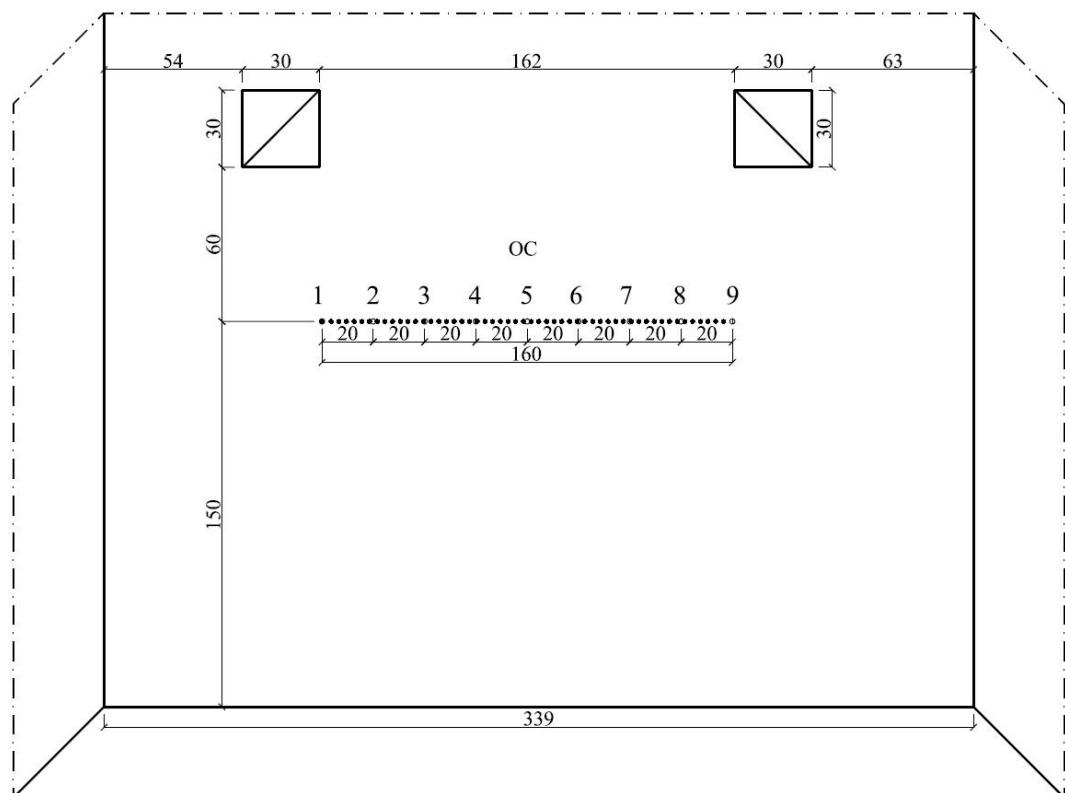


Fig. 1.87 – Restituzione grafica della posizione di prova OC.



Fig. 1.88 – Foto della posizione di prova OC.

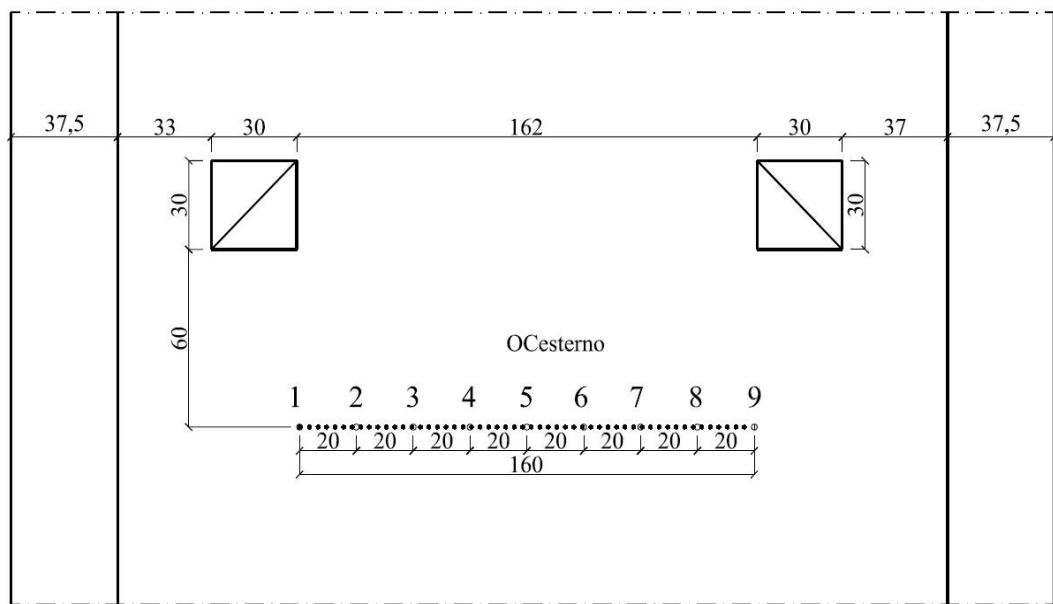


Fig. 1.89 – Restituzione grafica della posizione di prova OCest.



Fig. 1.90 – Foto della posizione di prova OCest.

Posizioni di prova ND, NEest, pianta a quota 9,62m

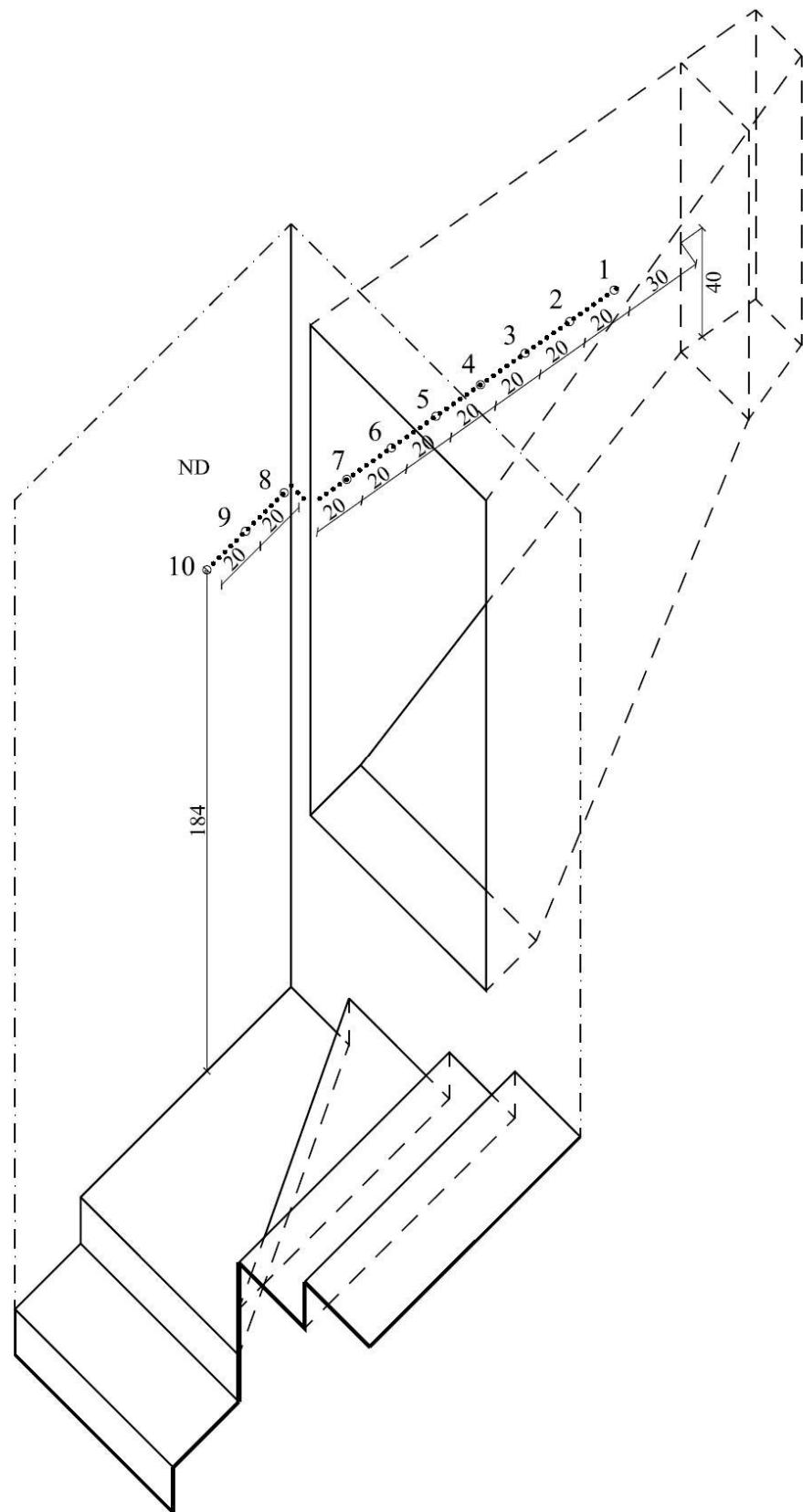


Fig. 1.91 – Restituzione grafica della posizione di prova ND.

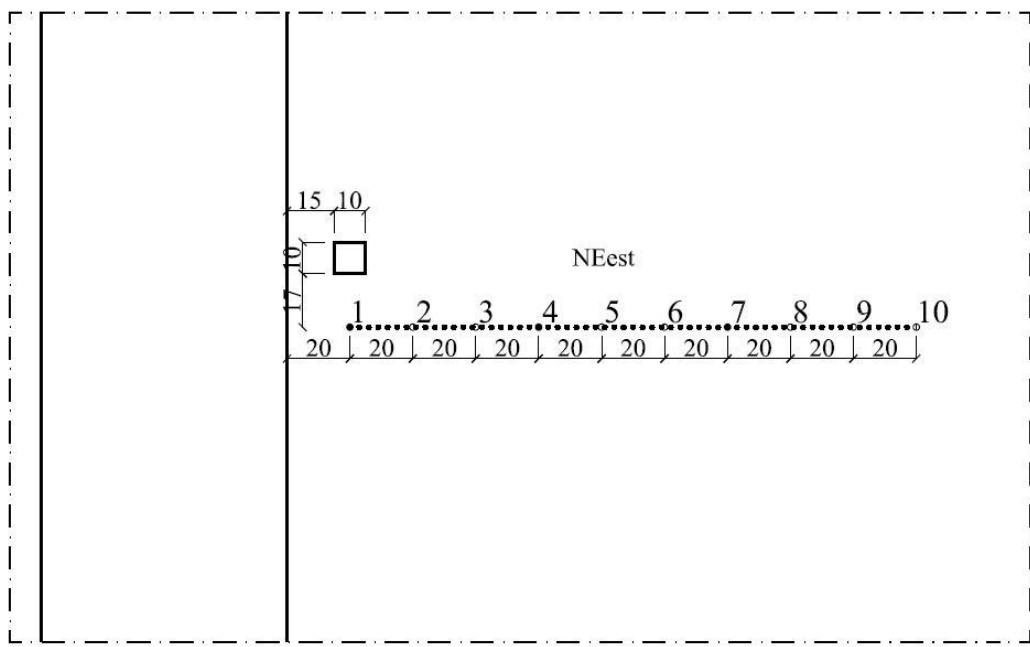


Fig. 1.92 – Restituzione grafica della posizione di prova NEest.

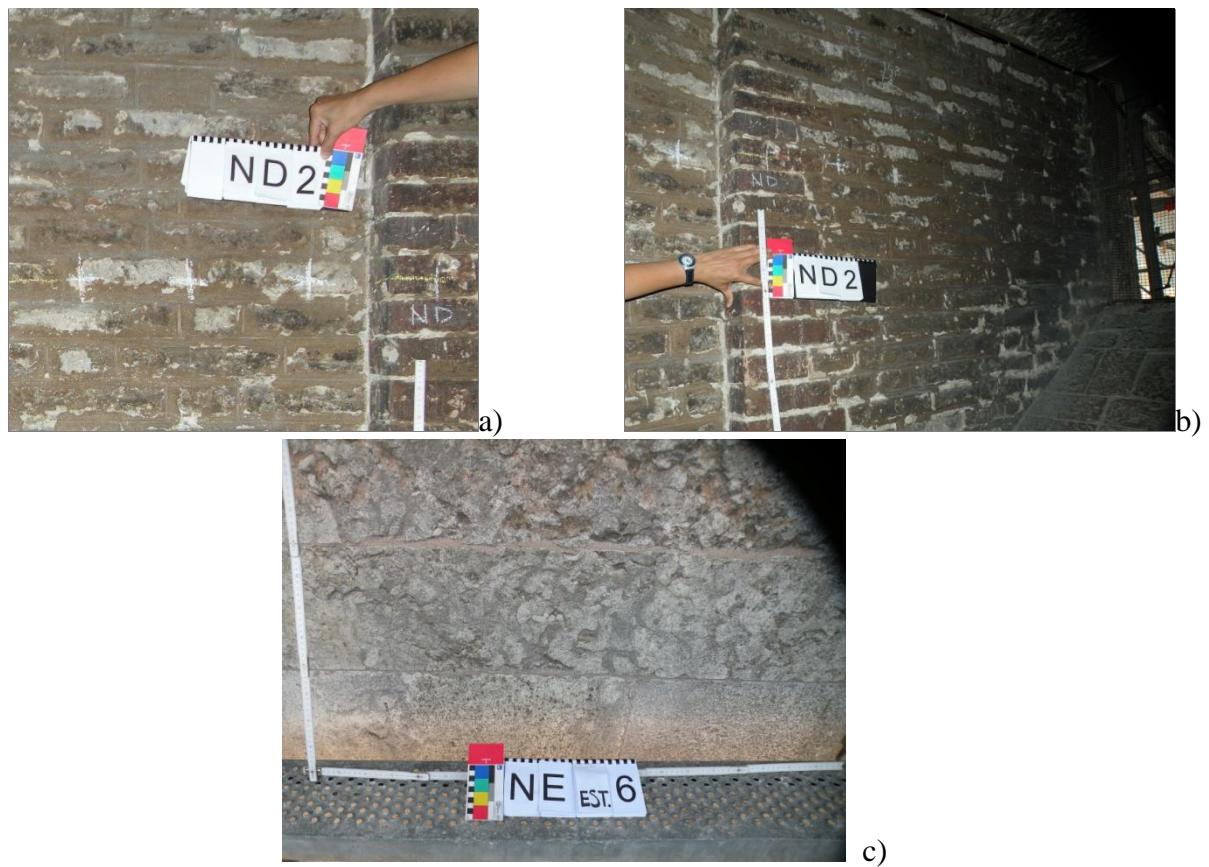


Fig. 1.93 – Foto delle posizioni di prova: a),b) ND; c) NEest.

Posizioni di prova ED, EEest, SF, pianta a quota 9,62m

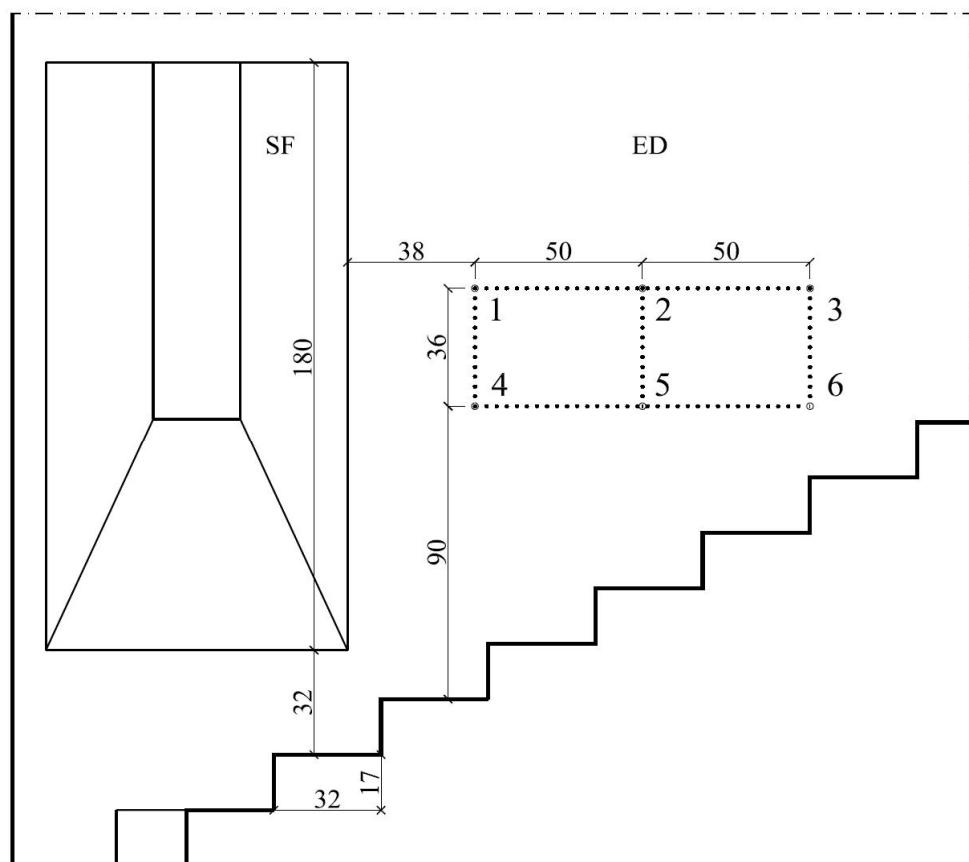


Fig. 1.94 – Restituzione grafica della posizione di prova ED.



Fig. 1.95 – Foto della posizione di prova ED.

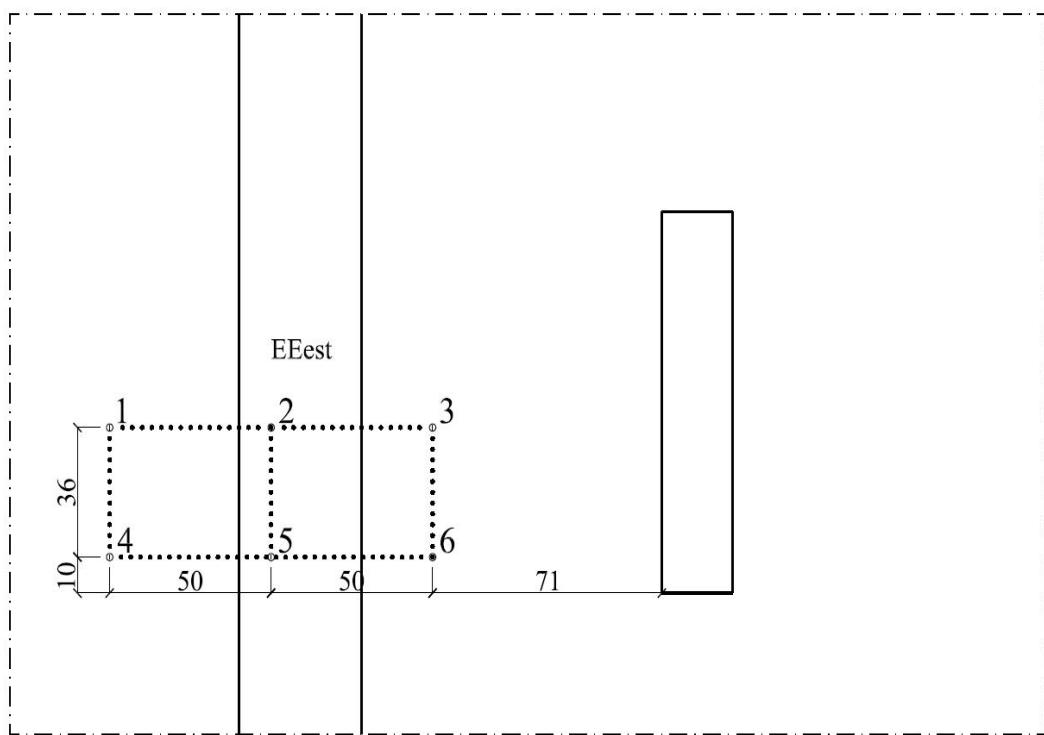


Fig. 1.96 – Restituzione grafica della posizione di prova EEest.



Fig. 1.97 – Foto della posizione di prova EEest.

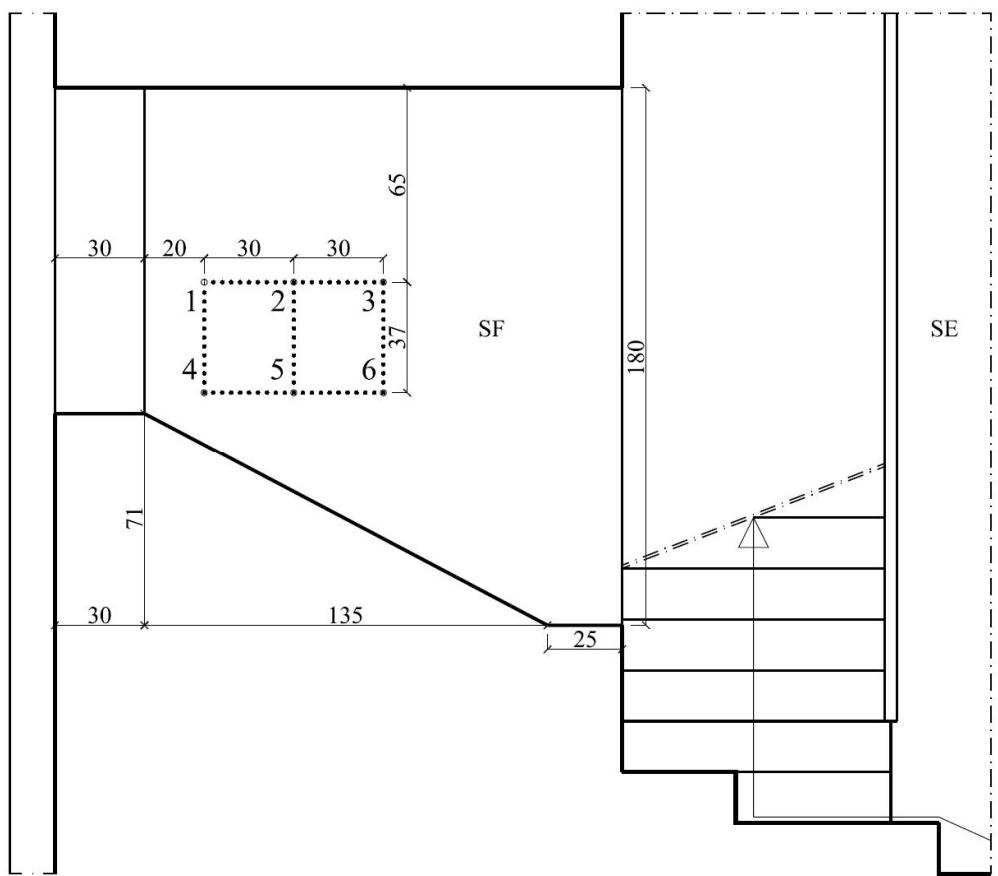


Fig. 1.98 – Restituzione grafica della posizione di prova SF.



Fig. 1.99 – Foto della posizione di prova SF.

Posizioni di prova NC, SE, OB, EC, pianta a quota 9,62m

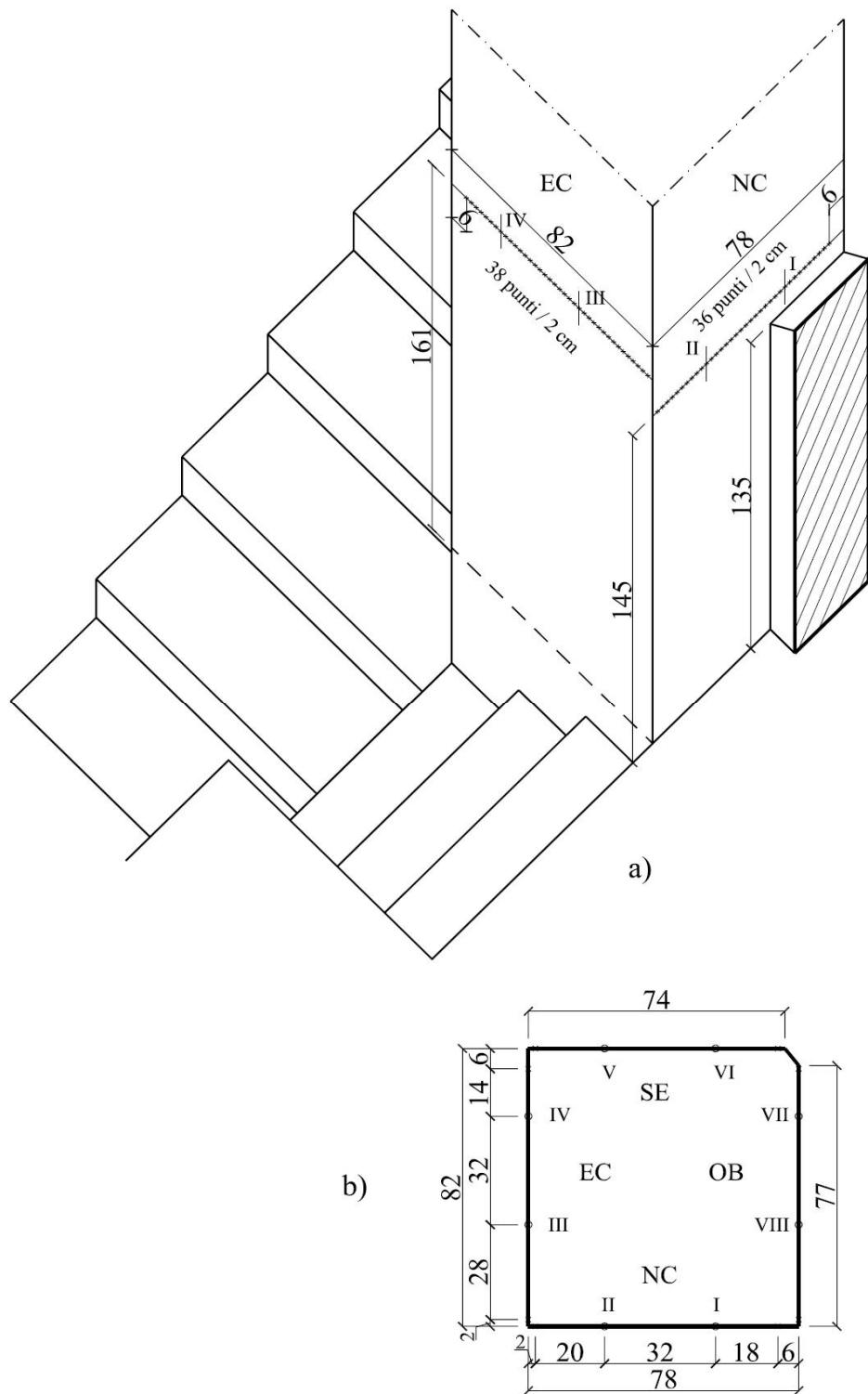


Fig. 1.100 – a) Restituzione grafica del pilastro al quale si riferiscono le posizioni di prova; b) indicazione, in sezione, dei punti utilizzati nelle prove superficiali e semidirette.

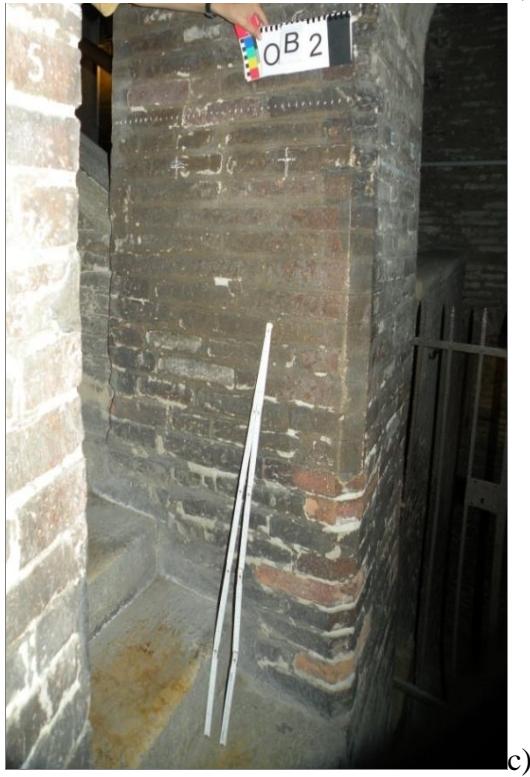


Fig. 1.101 – Foto delle posizioni di prova: a) NC; b) SE; c) OB; d) EC.

Piano tre, 23,00m

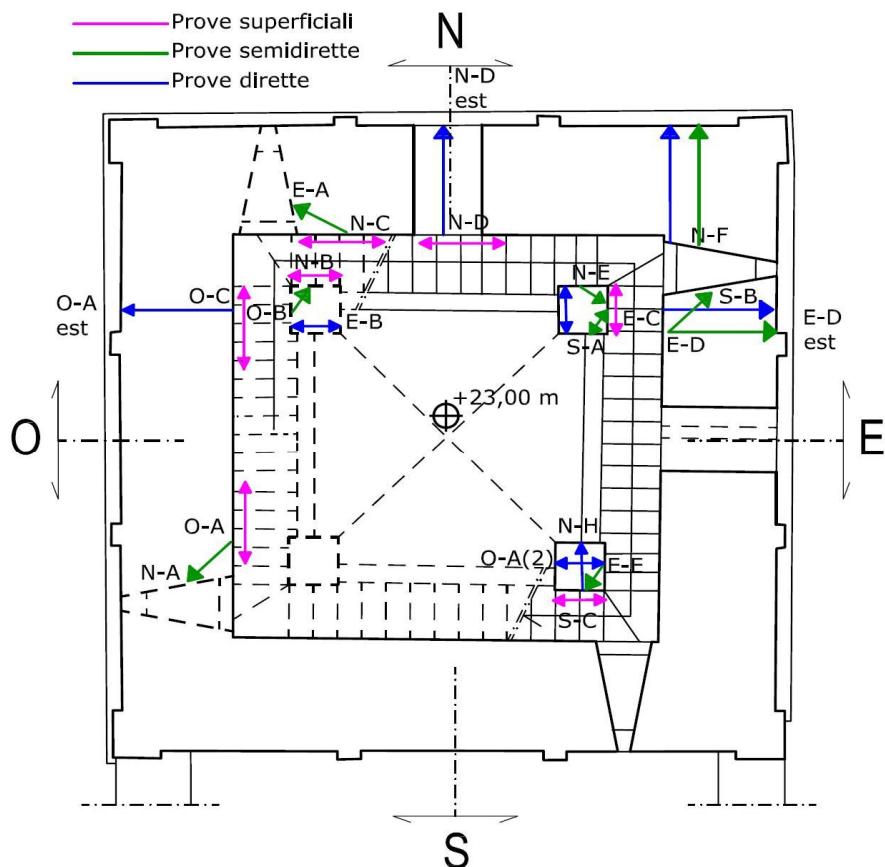
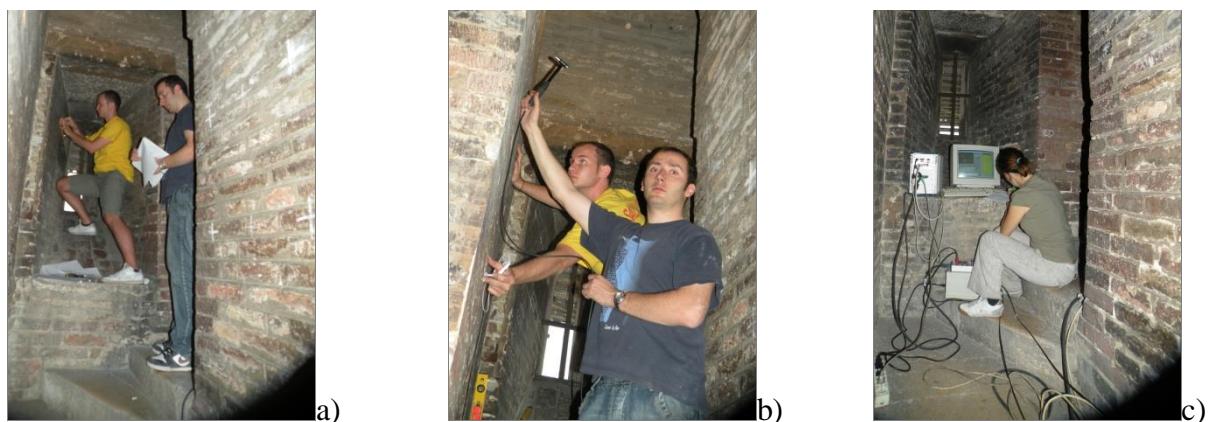


Fig. 1.102 – Quota +23,00m, pianta del piano due: pareti indagate e tipo di prove soniche.



Piano quattro, 30,00m

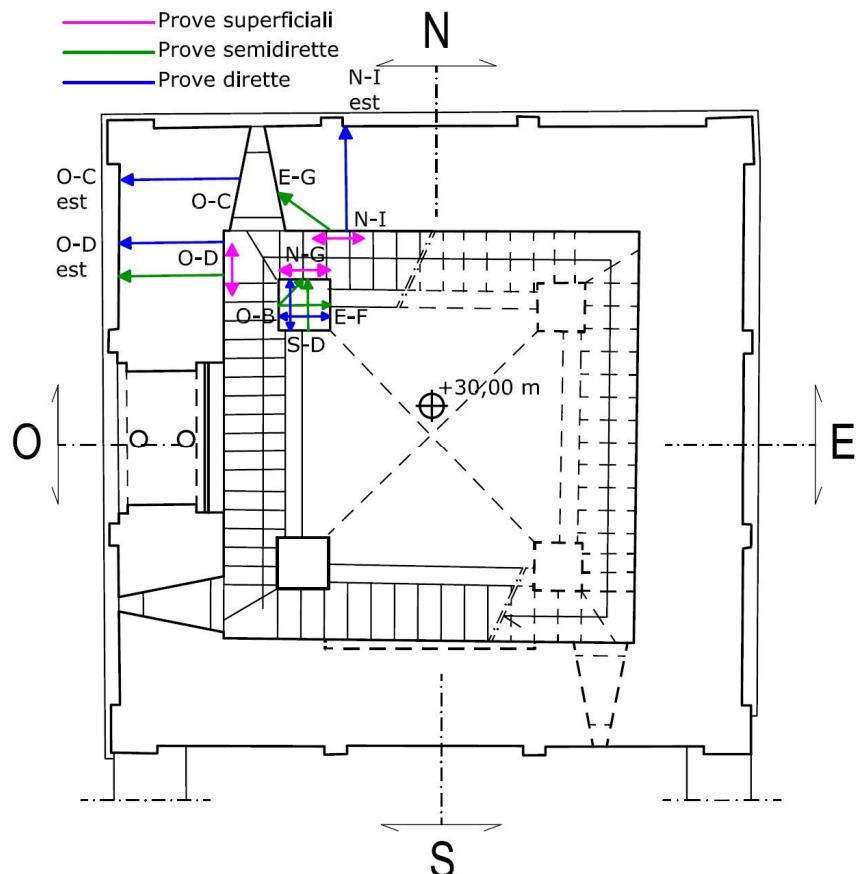


Fig. 1.131 – Quota +30,00m, pianta del piano quattro: pareti indagate e tipo di prove soniche.



Fig. 1.132 – Realizzazione di prove superficiali sulla parete OD.

Stanza dei torresani, 35,42m

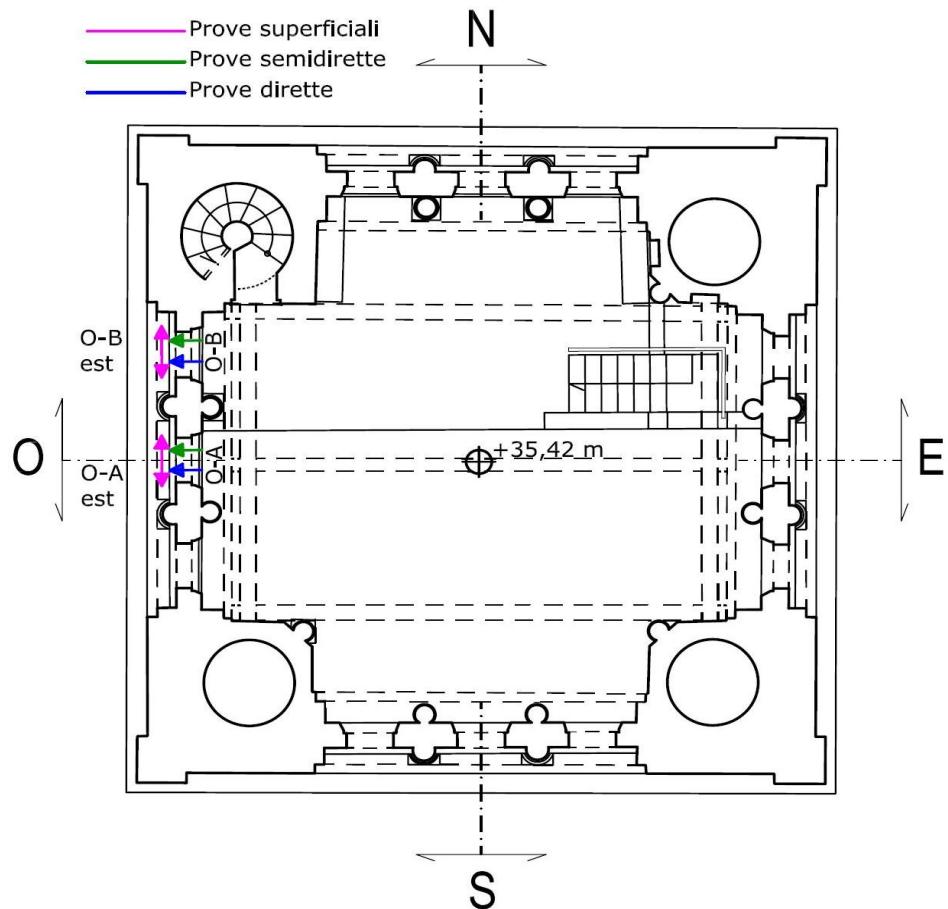


Fig. 1.133 – Quota +35,42m, pianta della stanza dei torresani: pareti indagate e tipo di prove soniche.



Fig. 1.134 – Realizzazione di prove soniche in corrispondenza della parete OB.

Stanza delle campane, 42,57m

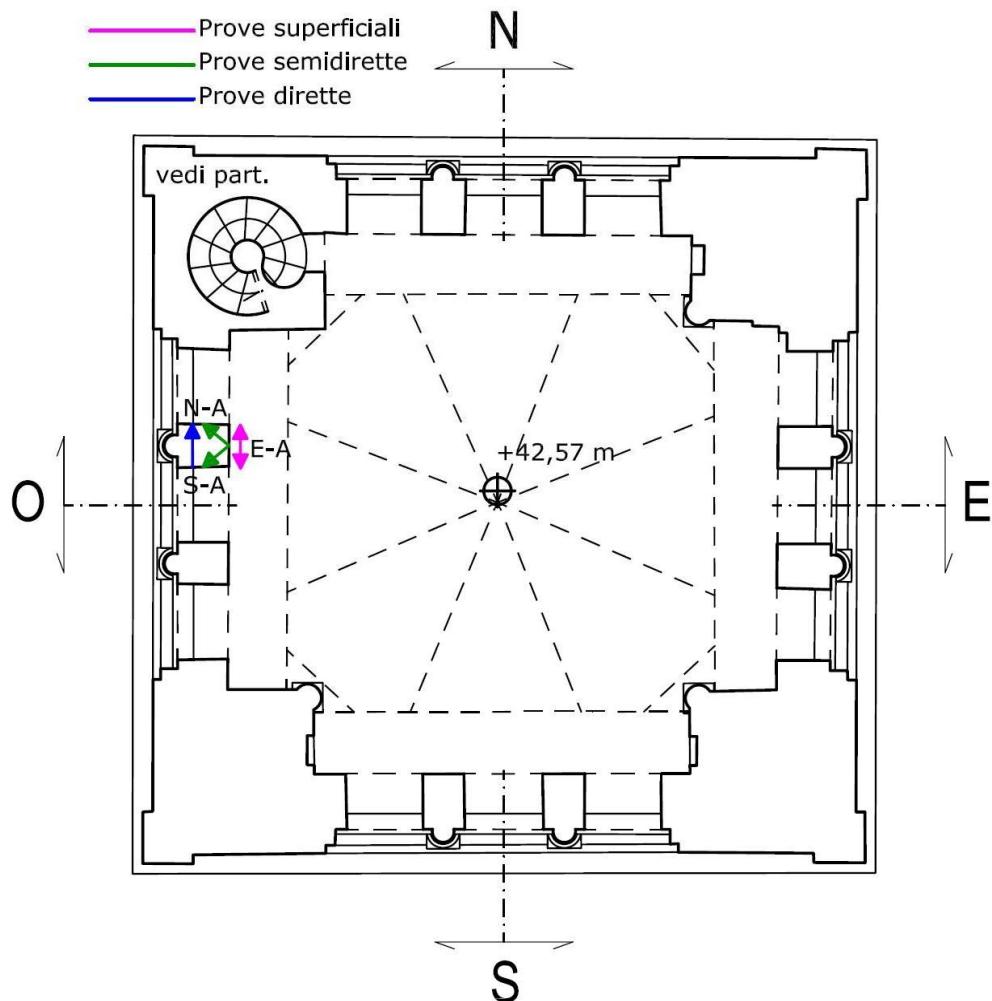


Fig. 1.135 – Quota +42,57m, pianta della stanza delle campane: pareti indagate e tipo di prove soniche.

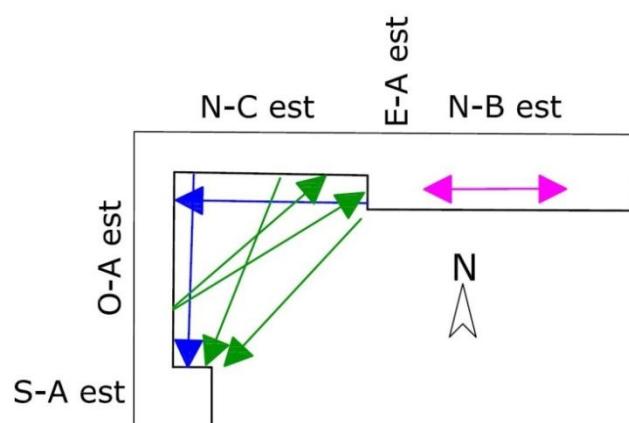


Fig. 1.136 – Quota +42,57m, particolare della lesena d’angolo in direzione Nord-Ovest.

Cuspide, livello zero, 49,36m

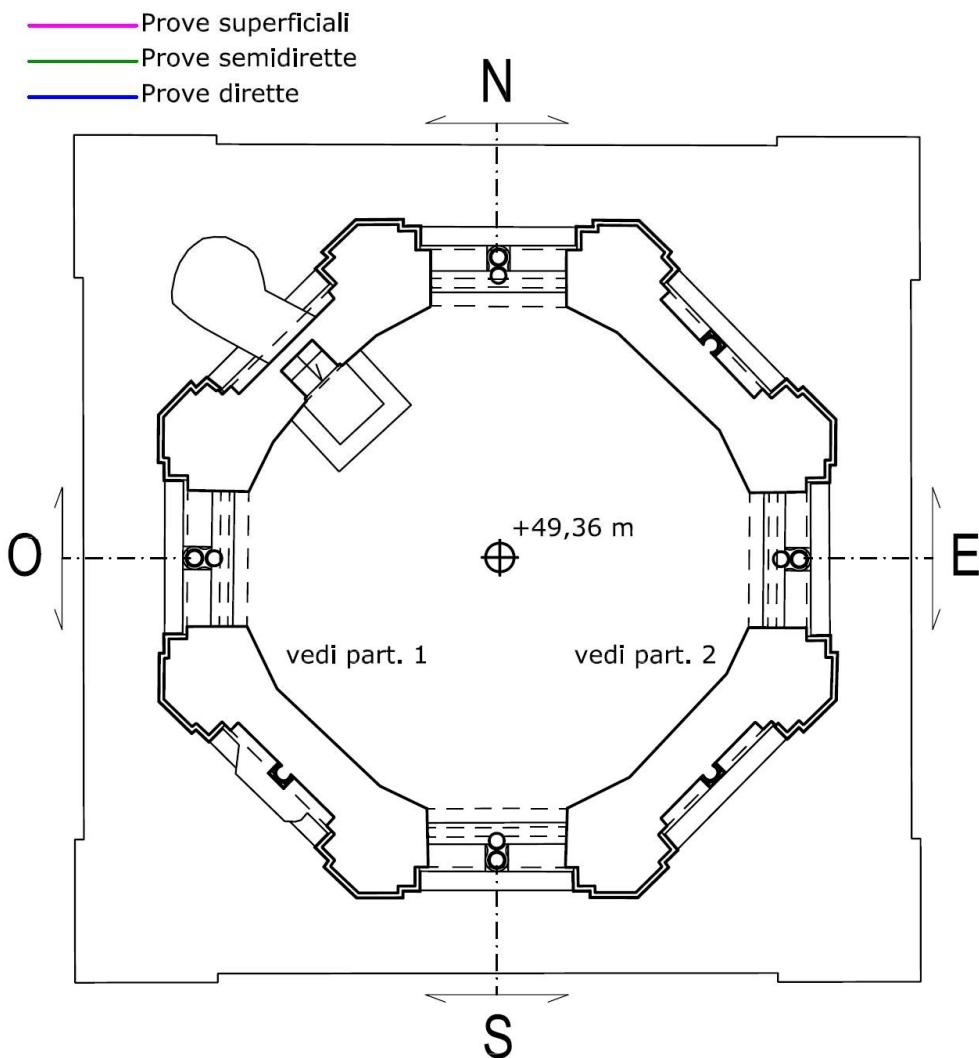


Fig. 1.137 – Quota +49,36m, pianta del livello zero della cuspide: pareti indagate e tipo di prove soniche.

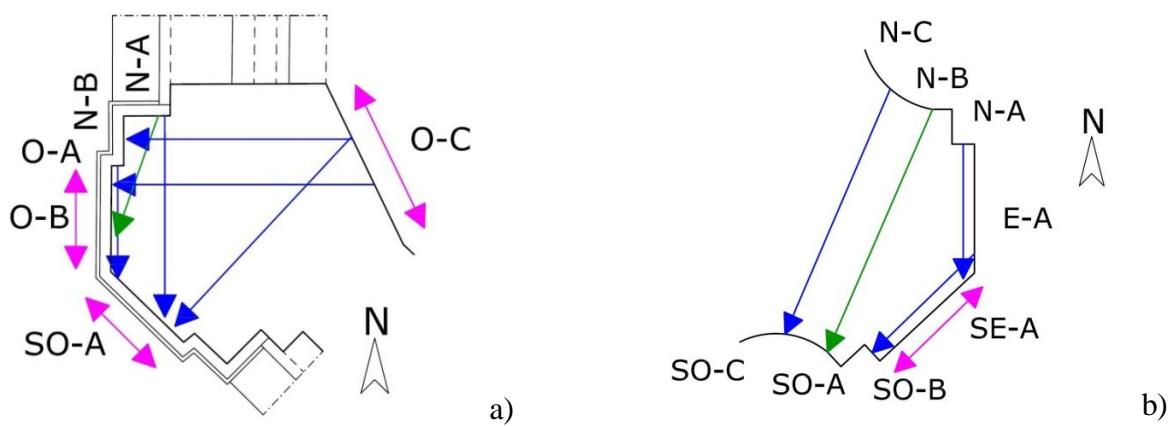


Fig. 1.138 – Quota +49,36m, restituzione grafica dei particolari: a) 1; b) 2.

Cuspide, livello uno, 57,12m

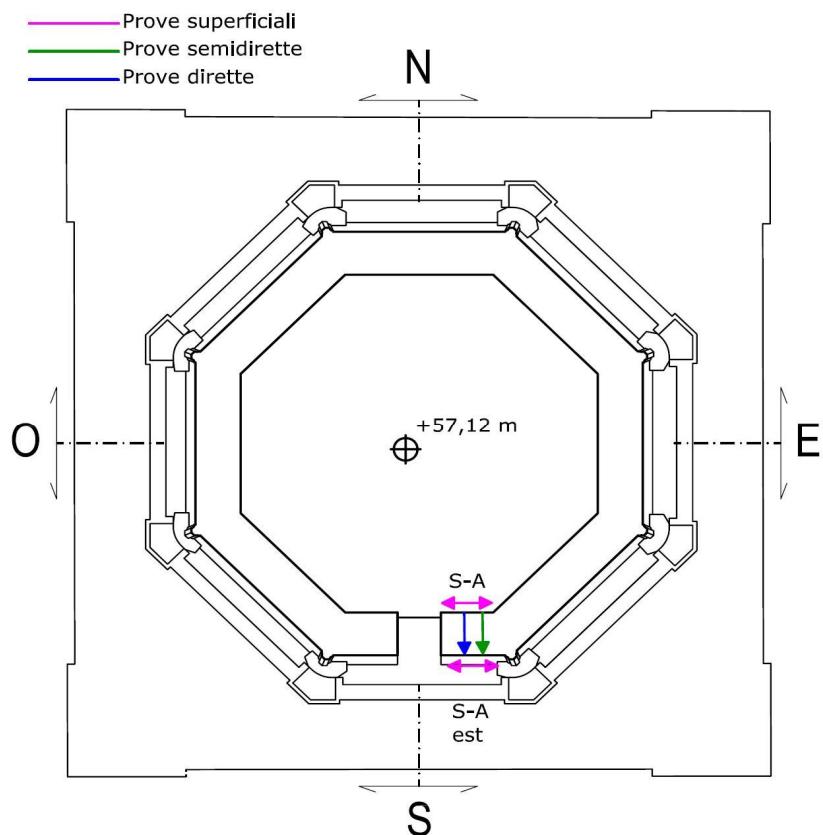


Fig. 1.139 – Quota +57,12m, pianta del livello 1 della cuspide: pareti indagate e tipo di prove.



Fig. 1.140 – Preparazione della griglia di prova sulla parete SAest.

Cuspide, livello due, 62,00m

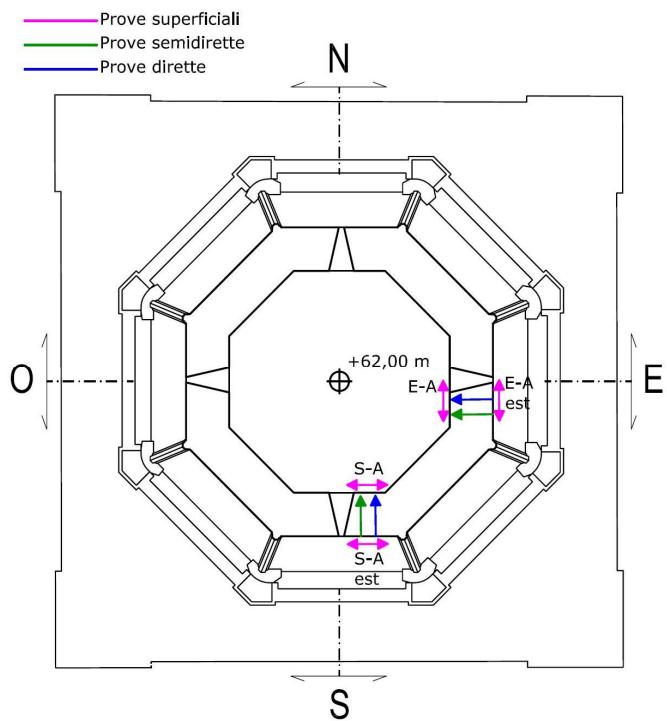


Fig. 1.141 – Quota +62,00m, pianta del livello 2 della cuspide: pareti indagate e tipo di prove.

Cuspide, livello tre, 66,00m

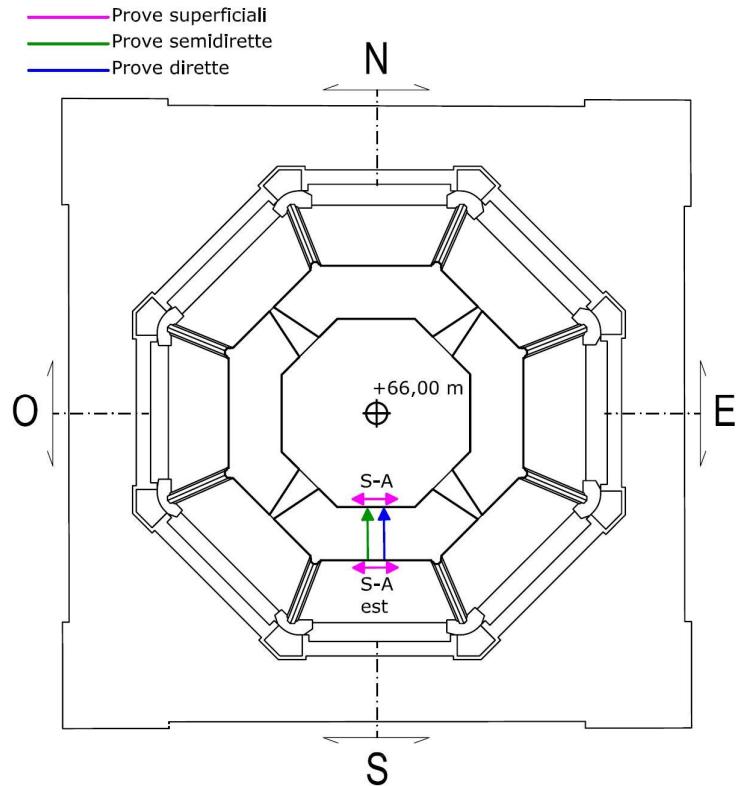


Fig. 1.142 – Quota +66,00m, pianta del livello 3 della cuspide: pareti indagate e tipo di prove soniche.

Cuspide, livelli quattro e cinque, 75,90m

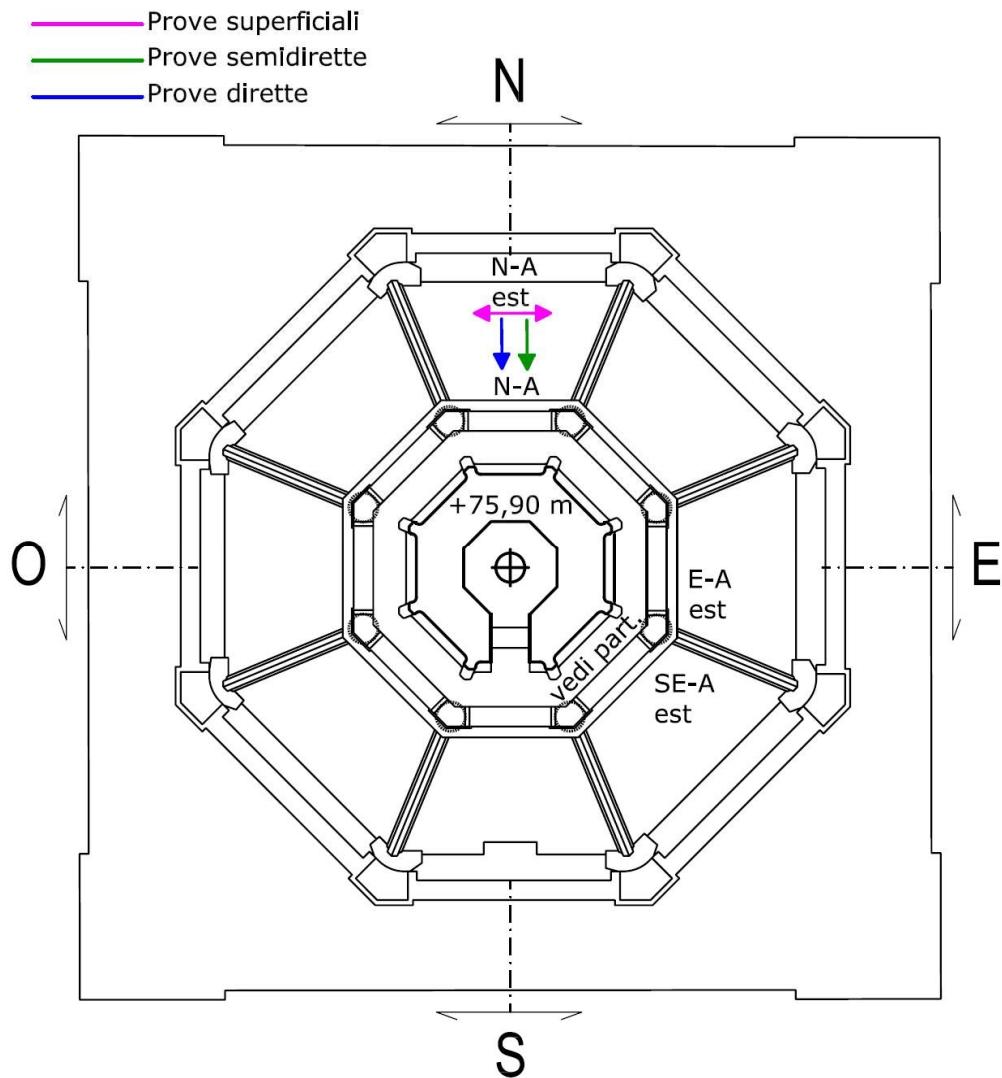


Fig. 1.143 – Quota +75,90m, pianta dei livelli 4 e 5 della cuspide: pareti indagate e tipo di prove soniche.

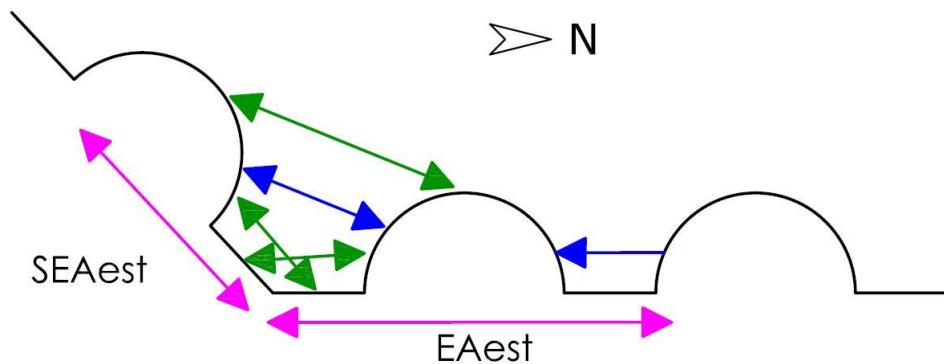


Fig. 1.144 – Quota +75,90m, particolare delle posizioni di prova SEAest, EAest.

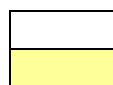
2. Elaborazioni dei risultati delle prove soniche

Di seguito vengono raccolti in tabelle e visualizzati in grafici i principali risultati conseguiti come valori medi delle velocità di propagazione dei segnali sonici registrati, suddivisi per metodologia di prova (superficiali, semidirette e dirette) e per quota nella Torre.

Tab. 2.1 – Velocità medie ottenute dalle prove soniche superficiali.

Prove superficiali					
Quota (m)	Parete e griglia	Elemento	Presenza di intonaco	v_m per posizione (m/s)	v_m per quota (m/s)
-2,79	OA		N	1624	1313
	SA		N	1275	
	SB		N	1041	
0,00	NA		S	1388	1524
	SA		N	1623	
	OA		N	1695	
	EA		N	1527	
	NC		S	1386	
3,44	SA		S	1055	1213
	EB		S	1090	
	OB		S	1266	
	SC		N	1529	
	SB		N	1127	
9,62	NAest		N	1812	1812
	NB		N	1515	
	EA		N	1446	
	SA		N	1528	
	SB		N	1361	
	EB		N	1259	1486
	SD		N	1523	
	NC,EC,SE,OB		N	1187	
	ED		N	1788	
	ND		N	1538	
	OC		N	1712	

Quota (m)	Parete e griglia	Elemento	Presenza di intonaco	v _m per posizione (m/s)	v _m per quota (m/s)		
23,00	OA		N	1565	1660	1660	
	OC		N	1590			
	NB		N	1702			
	NC		N	1501			
	ND		N	1991			
	EC		N	1643			
	SC		N	1626			
30,00	NG		N	1352	1336	1336	
	NI		N	1280			
	OD		N	1377			
35,42	OBest		N	3726	3530	3530	
	OAest		N	3334			
42,57	EA		S	1976	2436	2436	
	NBest		N	2896			
49,36	OC		S	1369	v _m est 2396	2280	
	OB		N	2606			
	SOA		N	2748	v _m 2241		
	SEAest		N	2396			
57,12	SAest		N	2835	1937	1937	
	SA		S	1039			
62,00	SAest		N	3412	v _m est 3210	2375	
	SA		S	1228			
	EAest		N	3008	v _m 1539		
	EA		S	1850			
66,00	SAest		N	3154	2140	2140	
	SA		S	1126			
75,90	NAest		N	3167	4164	4164	
	SEAest		N	4487			
	EAest		N	4837			



Prove superficiali eseguite sulla muratura interna

Prove superficiali eseguite sul paramento esterno in pietra

Velocità medie riscontrate dalle prove superficiali

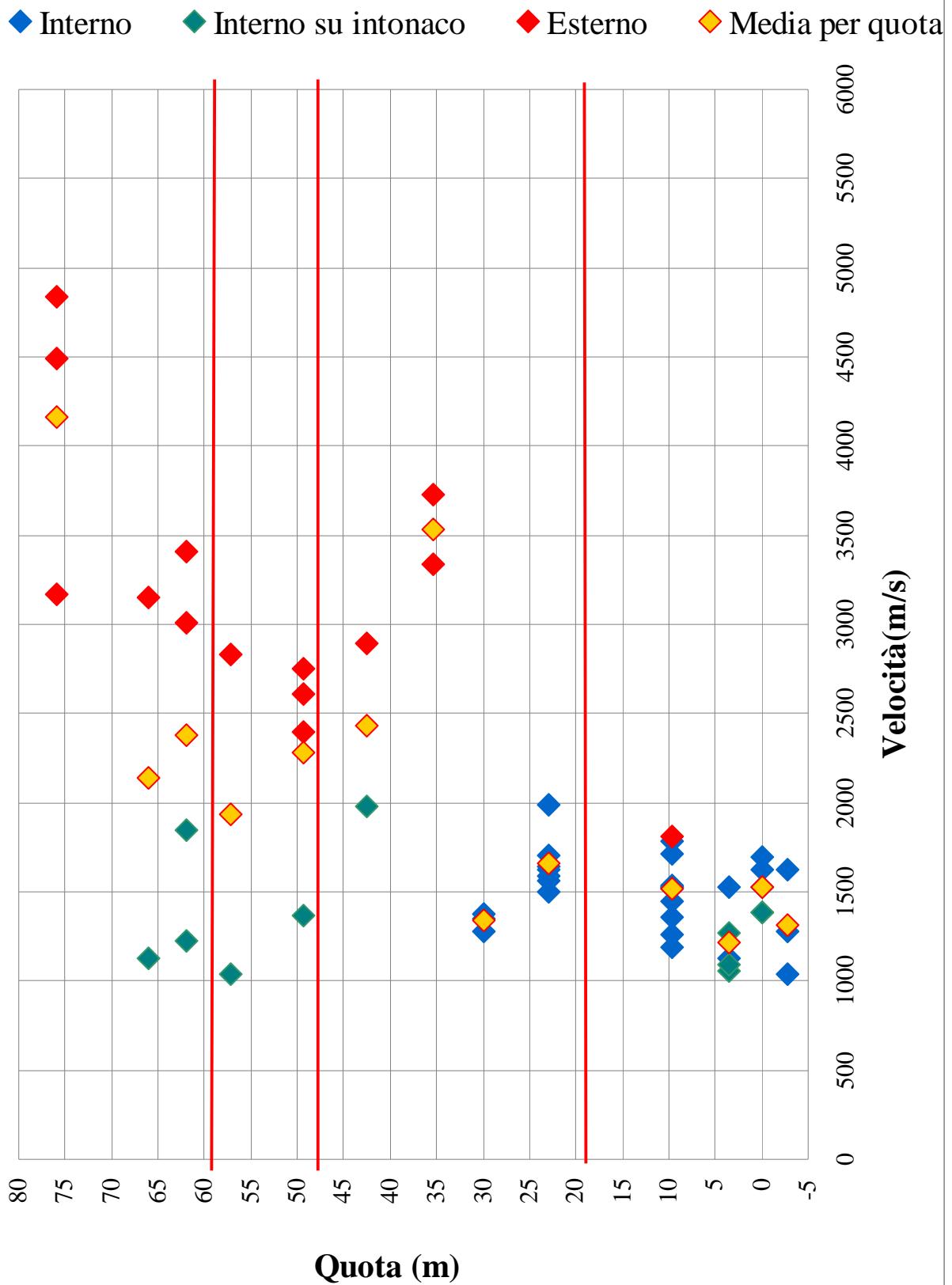


Fig. 2.1 – Velocità medie riscontrate dalle prove superficiali, suddivise per quota e con indicazione, in rosso, delle fasi costruttive (cfr. Tab. 2.1).

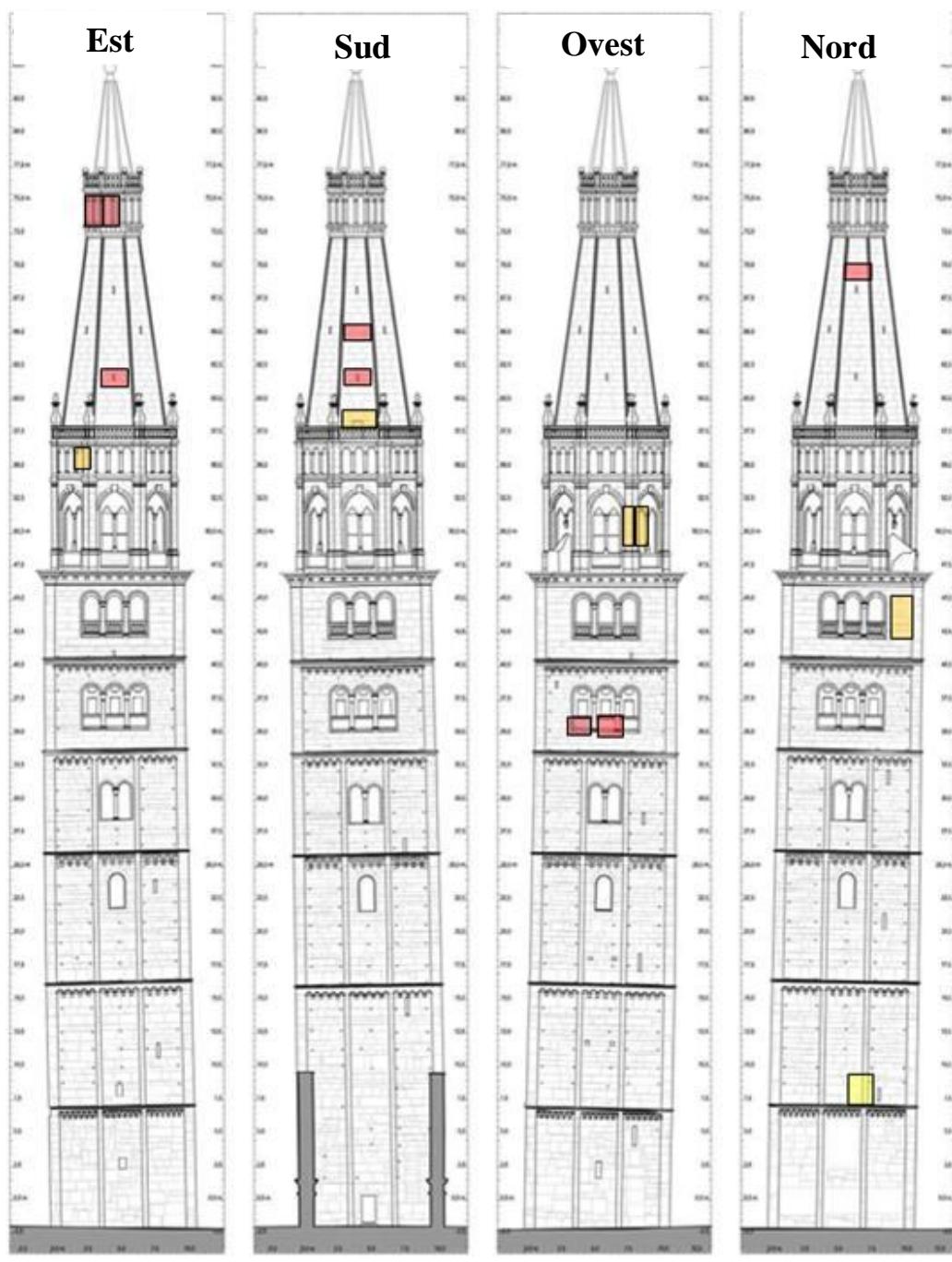


Fig. 2.2 – Prove superficiali, prospetti esterni: visualizzazione delle posizioni e dei risultati attraverso intervalli di velocità sonica (cfr. Tab. 2.1 e Fig. 2.1).

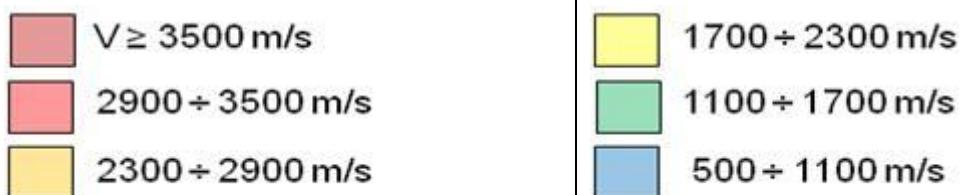
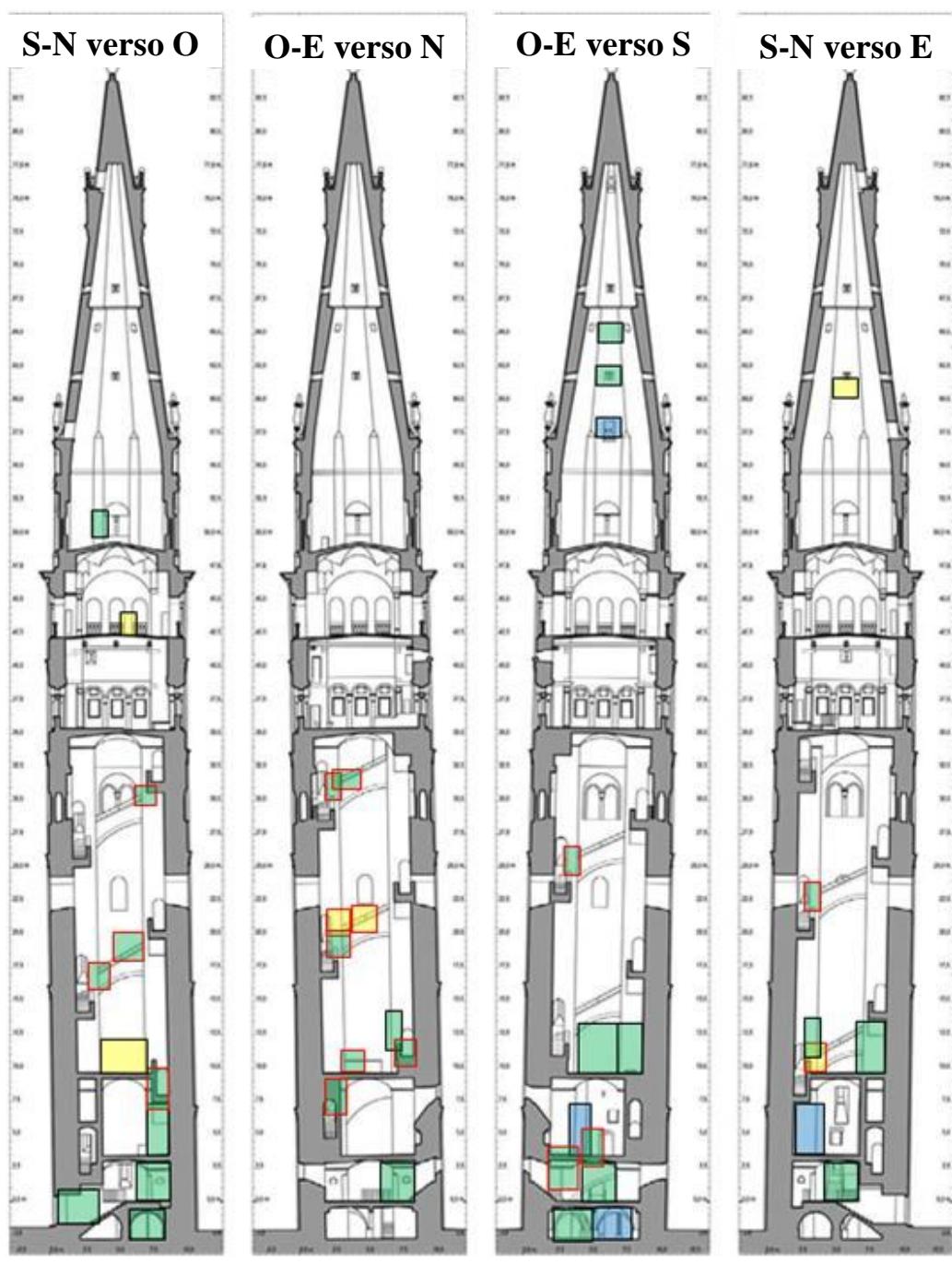
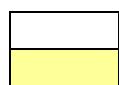


Fig. 2.3 – Prove superficiali, sezioni interne: visualizzazione delle posizioni e dei risultati attraverso intervalli di velocità sonica (cfr. Tab. 2.1 e Fig. 2.1).

Tab. 2.2 – Velocità medie ottenute dalle prove soniche semidirette.

Prove semidirette					
Quota (m)	Parete e griglia	Elemento	Presenza di intonaco	v_m per posizione (m/s)	v_m per quota (m/s)
-2,79	NA		N	2216	1821
	SA		N	1746	
	SB		N	1650	
	OB		N	1539	
	EC		N	1827	
	SC		N	1947	
0,00	NB		S	520	1525
	OA		N	1711	
	EA		N	1645	
	OB		S	1705	
	SC		S	2043	
3,44	NB		S	1565	1505
	NC		S	1444	
9,62	EA		N	1409	1537
	SB		N	1321	
	SC		N	1441	
	NC,EC,SE		N	1565	
	NB		N	1993	
	ED		N	1491	
23,00	OA		N	1832	1664
	OB		N	1732	
	NE		N	1843	
	SA		N	1298	
	EC		N	1841	
	ED		N	1524	
	ED		N	1450	
	NF		N	1432	

Quota (m)	Parete e griglia	Elemento	Presenza di intonaco	v_m per posizione (m/s)	v_m per quota (m/s)
23,00	EE		N	2020	1664
30,00	OB		N	1698	1492
	OB		N	1248	
	SD		N	1305	
	OD		N	1382	
	NI		N	1825	
35,42	OA		S	2268	2290
	OB		S	2312	
42,57	EA		S	1197	2500
	EA		S	1484	
	OAest		N	3491	
	OAest		N	2785	
	NCest		N	2779	
49,36	EAest		N	3265	4016
	NA		N	4000	
	NBest		N	4031	
57,12	SA		S	1790	1790
62,00	SAest		N	1553	1836
	EAest		N	2118	
66,00	SAest		N	1566	1566
75,90	NAest		N	2533	3579
	EAest		N	4299	
	SEAest		N	3904	



Prove semidirette eseguite sulla muratura interna

Prove semidirette eseguite in parte sul paramento esterno in pietra

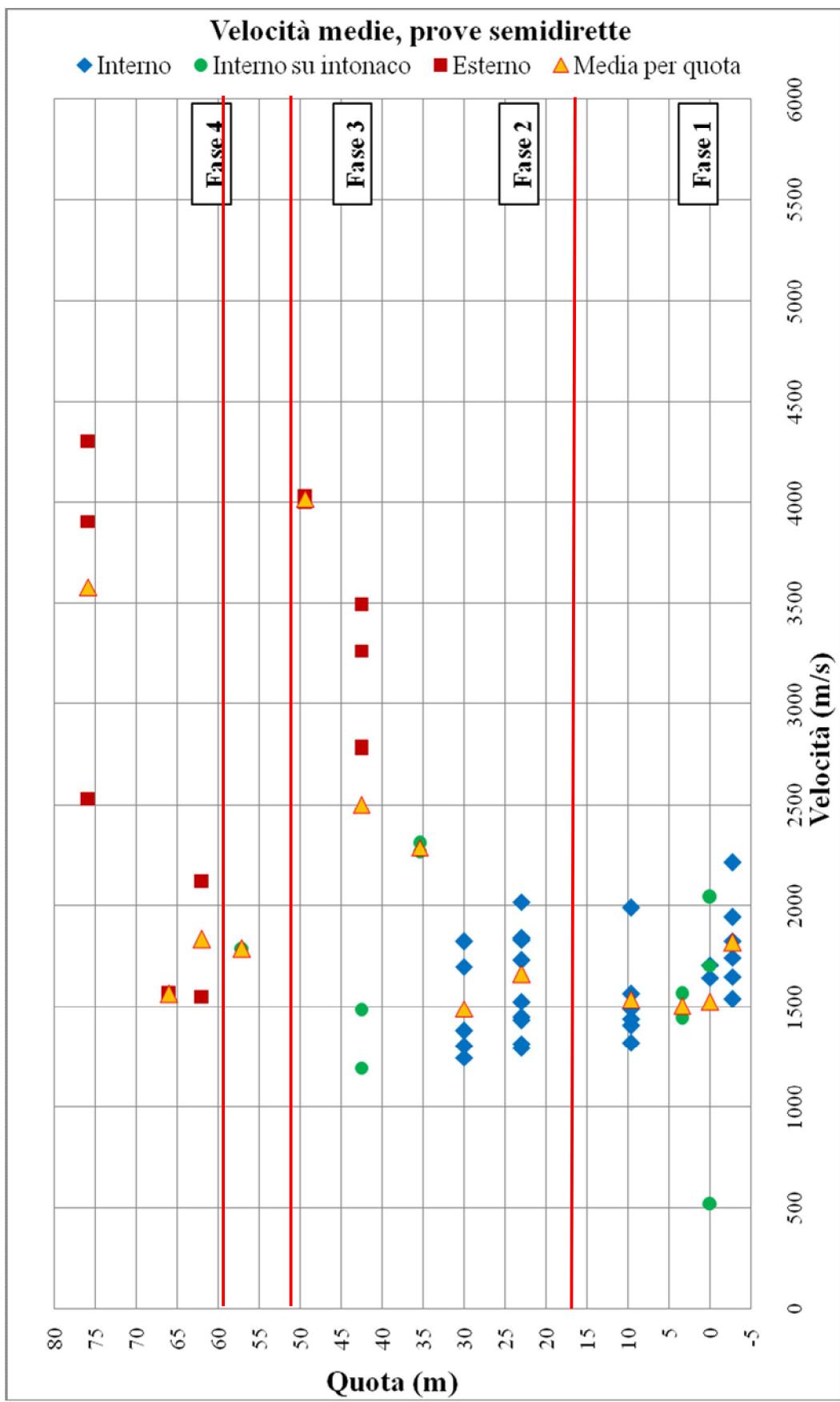


Fig. 2.4 – Velocità medie riscontrate dalle prove semidirette, suddivise per quota e con indicazione, in rosso, delle fasi costruttive (cfr. Tab. 2.2)

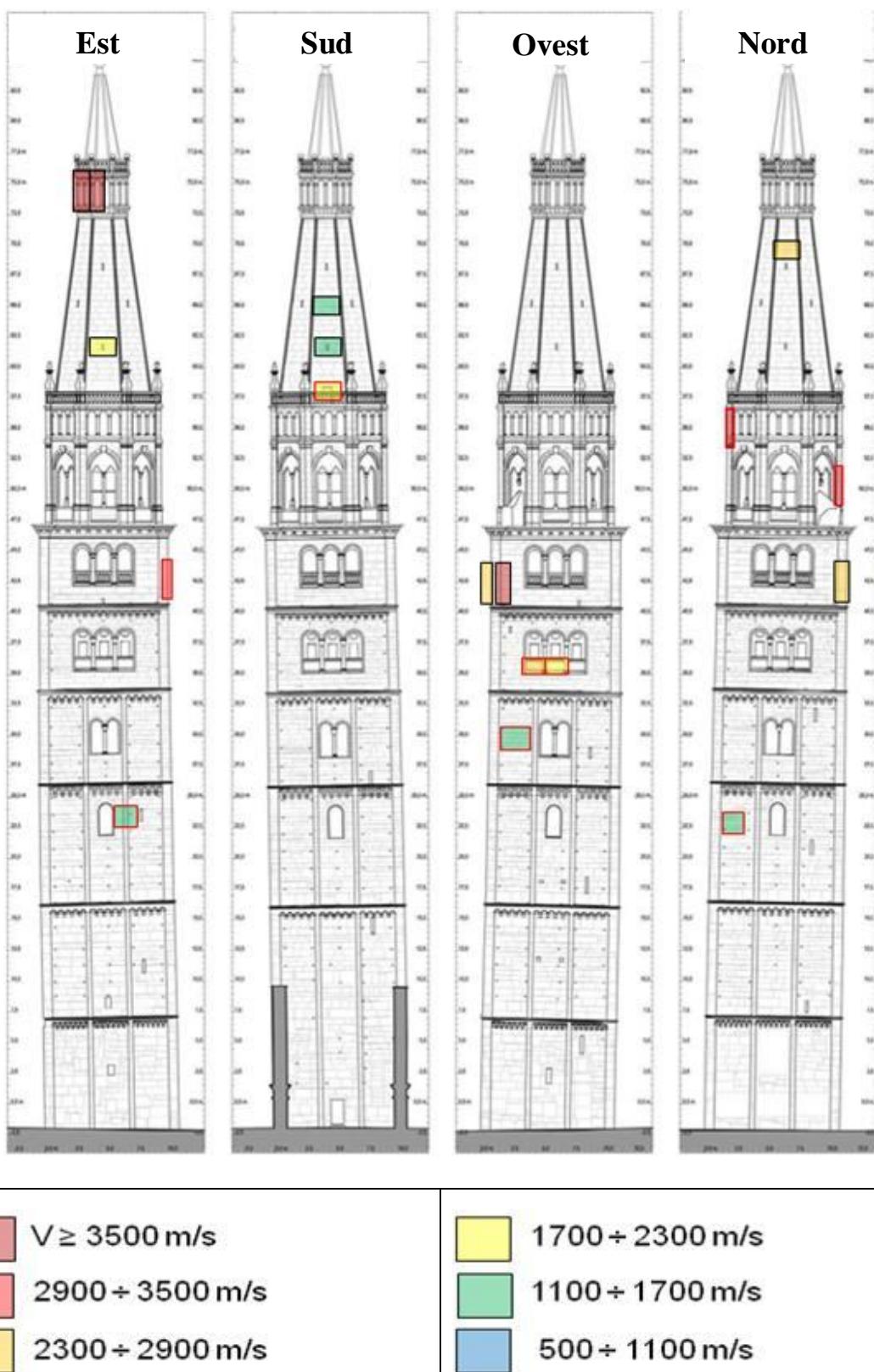


Fig. 2.5 – Prove semidirette, prospetti esterni: visualizzazione delle posizioni e dei risultati attraverso intervalli di velocità sonica (cfr. Tab. 2.2 e Fig. 2.4).

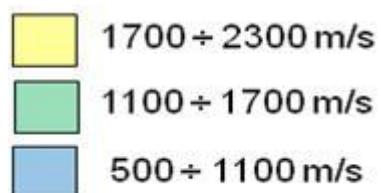
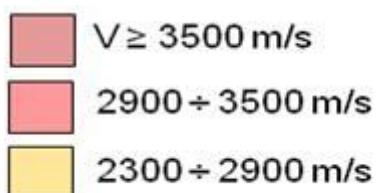
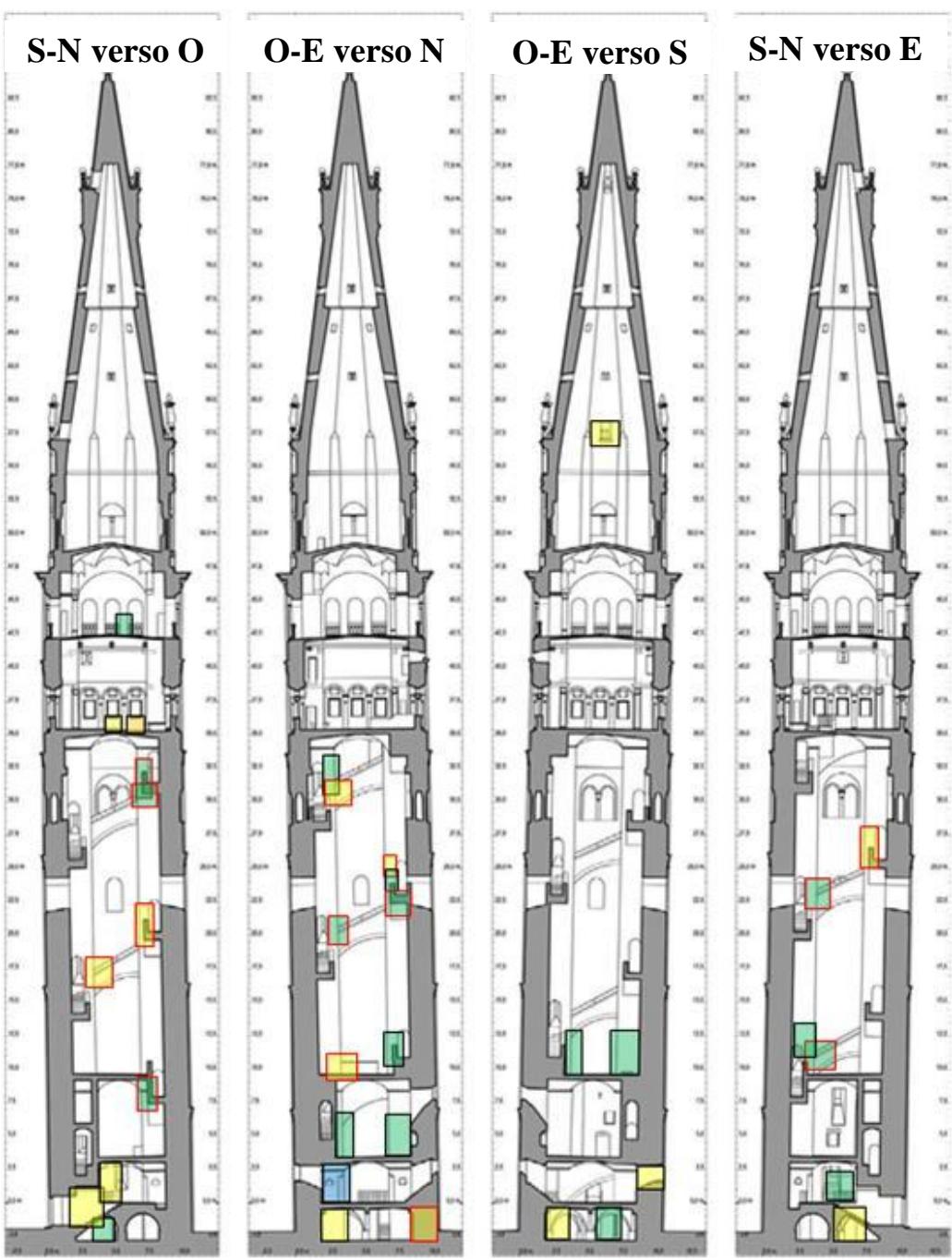
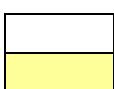


Fig. 2.6 – Prove semidirette, sezioni interne: visualizzazione delle posizioni e dei risultati attraverso intervalli di velocità sonica (cfr. Tab. 2.2 e Fig. 2.4).

Tab. 2.3 – Velocità medie ottenute dalle prove soniche dirette.

Prove dirette					
Quota (m)	Parete e griglia	Elemento	Parete intonacata (SI/NO)	vm per posizione (m/s)	vm per quota (m/s)
0,00	SBest		N	2136	v _m est 1711
	EA		N	1674	
	EBest		N	1716	
	SA		N	2230	
	SA		N	2422	v _m 2109
	OAest		N	1592	
	OBest		N	1378	
	OCest		N	1733	
3,44	SA		S	829	v _m est 977
	OC		N	2017	
	EC		N	918	
	OFest		N	977	v _m 1339
	OE		N	1092	
	ED		N	1837	
9,62	NAest		N	1563	v _m est 1563
	EC		N	1832	
	SE		N	1733	
	ED		N	1343	v _m 1586
	ND		N	1755	
	OC		N	1269	
23,00	OC		N	1959	2015
	EB		N	2151	
	ND		N	1869	
	NE		N	2265	
	SA		N	2318	
	ED		N	1543	
	NF		N	1320	
	EE		N	2338	
	OA(2)		N	2379	
	SC		N	2420	

Quota (m)	Parete e griglia	Elemento	Parete intonacata (SI/NO)	vm per posizione (m/s)	vm per quota (m/s)
30,00	OB		N	1529	1604
	SD		N	1938	
	NG		N	1833	
	OD		N	1534	
	OC		N	1511	
	NI		N	1278	
35,42	OA		S	2104	2343
	OB		S	2581	
42,57	NA		S	1701	3485
	NCest		N	4194	
	EAest		N	4559	
49,36	NA		N	4735	2882
	NB		N	3826	
	OC		S	1048	
	OC		S	1243	
	OC		S	1424	1841
	NAest		N	4981	
	EAest		N	3902	
	NCest		N	1895	
57,12	SA		S	1841	1841
62,00	SAest		N	1806	1999
	EAest		N	2192	
66,00	SAest		N	1550	1550
75,90	NAest		N	2649	4485
	EAest		N	5399	
	SEAest		N	5407	



Prove dirette eseguite sulla muratura

Prove dirette eseguite su percorsi che attraversano anche il paramento esterno in pietra

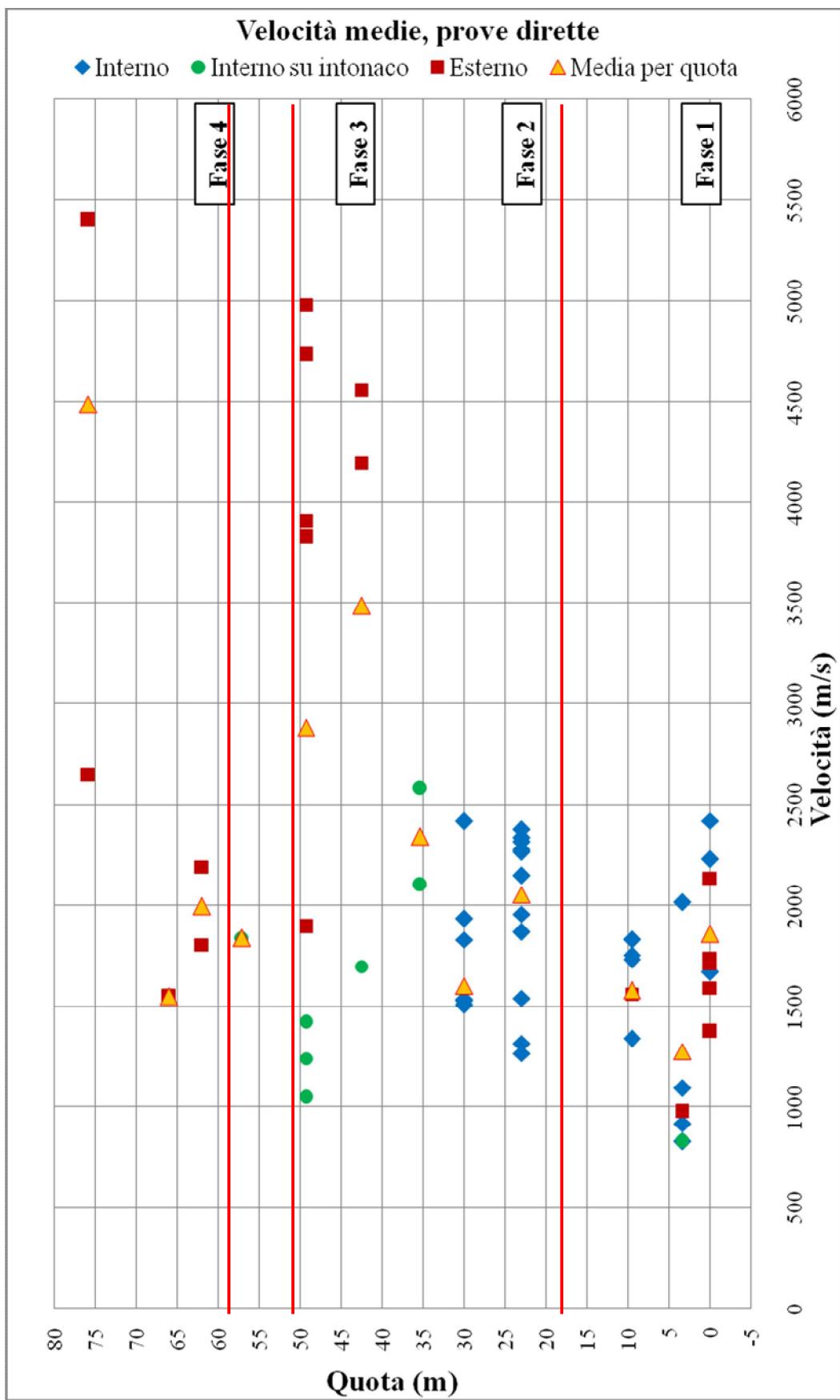


Fig. 2.7 – Velocità medie riscontrate dalle prove dirette, suddivise per quota con indicazione, in rosso, delle fasi costruttive (cfr. Tab. 2.3).

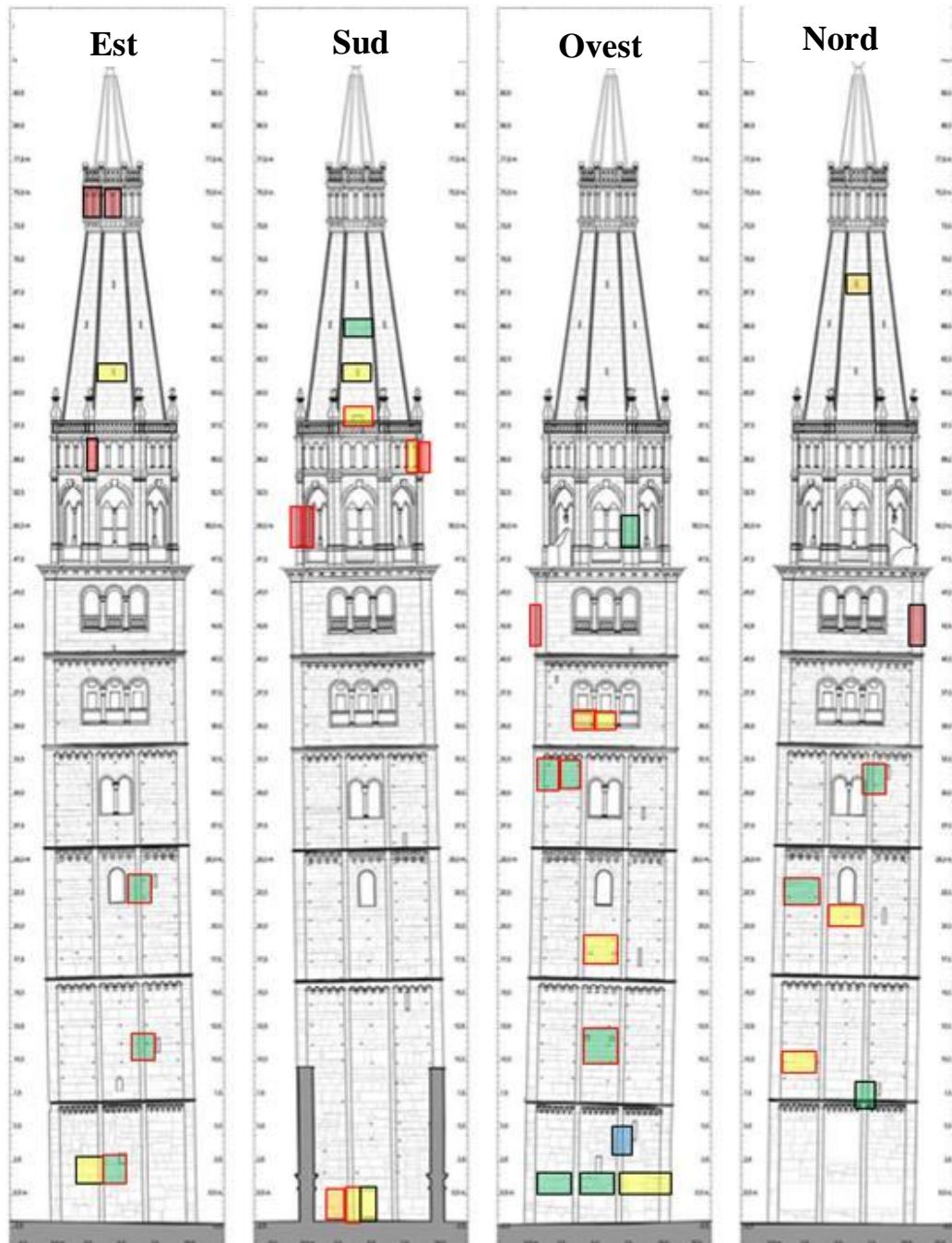


Fig. 2.8 – Prove dirette, prospetti esterni: visualizzazione delle posizioni e dei risultati attraverso intervalli di velocità sonica (cfr. Tab. 2.3 e Fig. 2.7).

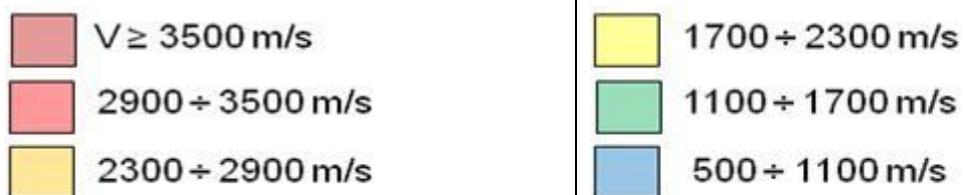
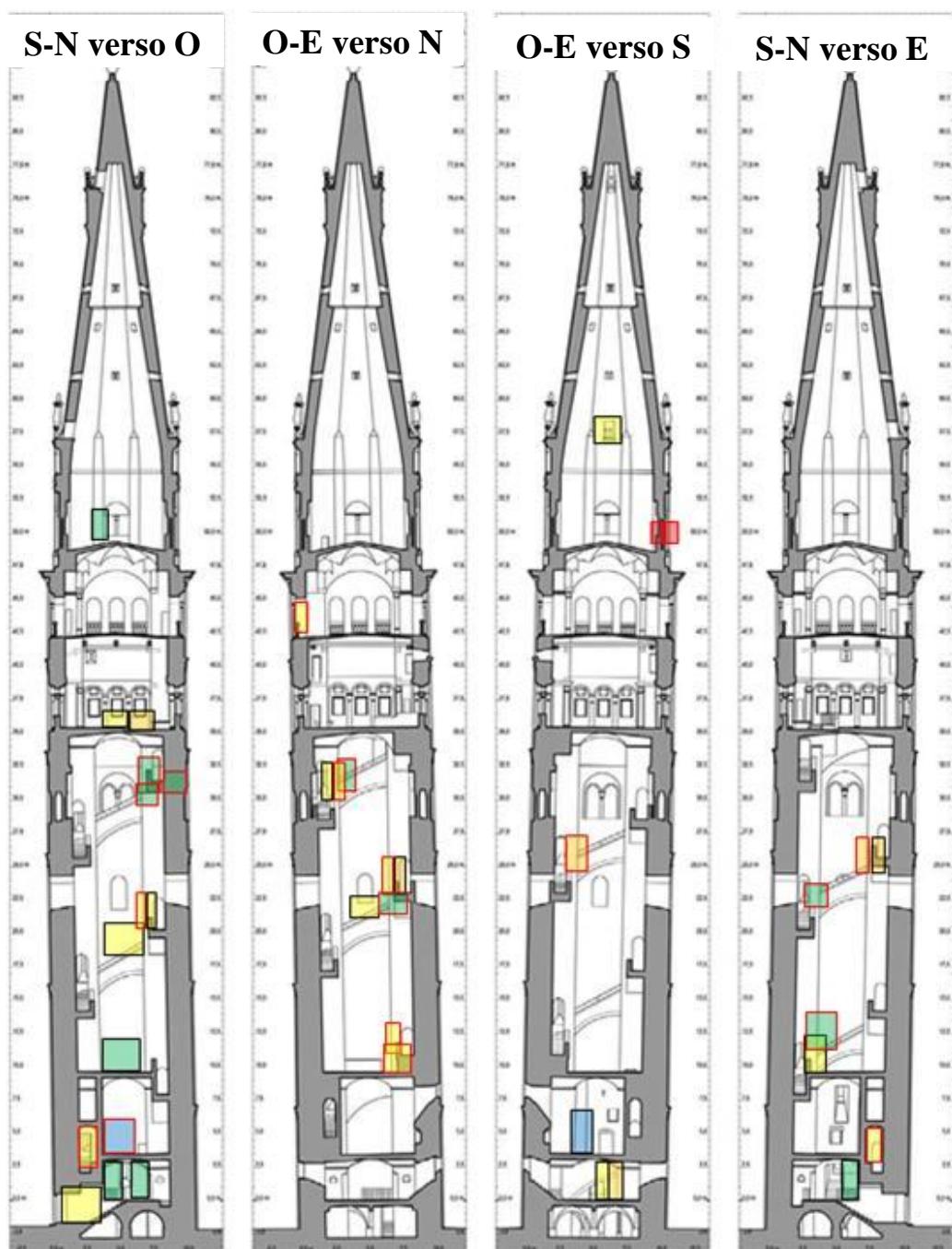


Fig. 2.9 – Prove dirette, sezioni interne: visualizzazione delle posizioni e dei risultati attraverso intervalli di velocità sonica (cfr. Tab. 2.3 e Fig. 2.7).

3. Esecuzione di microcarotaggi

Successivamente alla conclusione delle elaborazioni dati delle prove non distruttive, sono state valutate le possibili posizioni di prelievo delle carote. Posizione e numerosità dei microcarotaggi sono stati concordati con la D.L. I microcarotaggi sono stati eseguiti nelle prima metà di dicembre 2009, con carotatrice HILTI ad acqua e sono state estratte microcarote di diametro nominale di 45 mm. Sono state considerate due diverse pareti e due pilastri angolari di muratura, a tre quote della torre: a 30 m, a 10 m e nel piano interrato, Fig. 3.1-3.3 e Tab. 3.1.

Per ogni posizione di prova sono state prelevate almeno 4 carote: una su mattone posto di lista, una su mattone posto di testa e due a cavallo di un giunto di malta (un giunto di malta verticale e un giunto di allettamento).

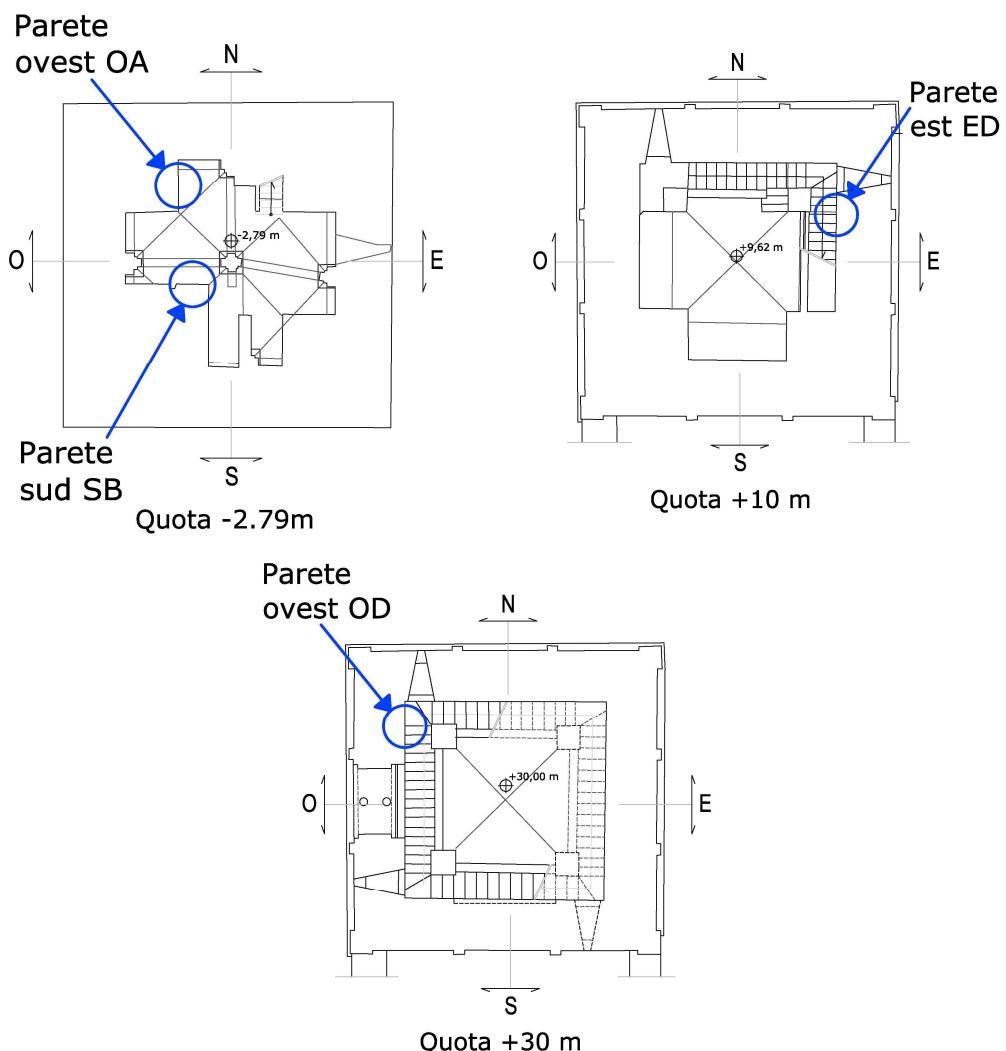


Fig. 3.1: Posizioni dei microcarotaggi all'interno della torre, nell'interrato (in alto a sinistra), a quota 10 m (in alto a destra), a quota 30 m (in basso).

Tab.3.1: Posizioni dei microcarotaggi all'interno della torre.

Piano	Quota	Elemento	Corrispondenza con griglia di misure	n° carote estratte
Interrato	- 2.79 m	Pilastro angolare N-O	ovest OA	4
Interrato	- 2.79 m	Pilastro angolare S-O	sud SB	5
Base del fusto	+ 10 m	Parete Est	est ED	4
Quattro	+ 30 m	Parete Ovest	ovest OD	4



Fig. 3.2: Esecuzione del microcarotaggio su una parete in muratura nella torre.



Fig. 3.3: Esempio di microcarote estratte ad una posizione di prova (quota 10 m).

4. Prove di compressione sui materiali

Laterizio

In laboratorio, le singole carote sono state fotografate e poi tagliate in modo da ottenere il maggior numero di provini cilindrici di laterizio con altezza nominale pari al diametro (Fig. 4.1); inoltre, ove possibile, dalle carote prelevate a cavallo dei giunti di malta sono stati estratti i giunti, realizzando il maggior numero possibile di lastrine di malta (Fig. 4.2).



Fig. 4.1: Esempio di provini di laterizio ricavati da 1 singola carota (quota 10 m, carota 1).



Fig. 4.2: Esempio di provini di malta ricavati da una carota (quota 10 m, carota 2).

Sono state effettuate prove di compressione assiale sui campioni di laterizio (Fig. 4.3) in accordo con la normativa UNI 772-1:2002 “Metodi di prova per elementi di muratura – Determinazione della resistenza a compressione”.

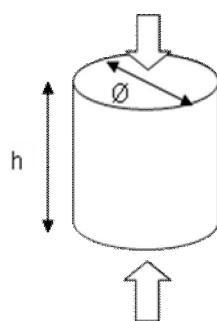


Fig. 4.3: Prova di compressione su campioni di laterizio: schema di carico

Le densità, i carichi di rottura ottenuti e le corrispondenti tensioni di rottura sono riportati in Tab. 4.2. Nella tabella, l’alternanza di sfondi grigi e bianchi delle righe si riferisce a provini ricavati dalla stessa carota.

Da notare che il campione 4A2, estratto dalla carota 4 prelevata dalla parete OA del piano interrato, non è stato provato poiché presentava un’inclusione e aveva uno spigolo rotto: caratteristiche che avrebbero falsato i risultati di prova.

Tab. 4.2: Risultati delle prove di compressione sui campioni cilindrici di laterizio.

Carota	Provino	Volume [cm ³]	Area di base [mm ²]	Carico di rottura [N]	Densità [g/cm ³]	Tensione di rottura [N/mm ²]
Quota 30 m, 1	1A1	71,50	6383,54	61500	1,70	9,63
Quota 30 m, 2 *	2A1	70,24	6275,88	816,5	1,78	0,13
Quota 30 m, 2	2A2	70,33	6267,32	91300	1,76	14,57
Quota 30 m, 2	2A3	71,02	6334,06	54000	1,82	8,53
Quota 10 m, 1	1A1	70,38	6290,18	65500	1,66	10,41
Quota 10 m, 1	1A2	69,93	6247,39	31900	1,64	5,11
Quota 10 m, 4	4A	70,71	6330,75	60000	1,58	9,48
Quota 10 m, 4	4B1	70,16	6278,94	118000	1,66	18,79
Quota 10 m, 4	4B2	69,75	6238,07	83500	1,67	13,39
Interrato, parete SB, 2	2A1	69,99	6271,80	88500	1,68	14,11
Interrato, parete SB, 2	2A2	69,48	6247,34	30000	1,61	4,80
Interrato, parete SB, 2	2A3	69,71	6259,73	36000	1,58	5,75
Interrato, parete SB, 5	5A1	70,94	6346,37	46000	1,73	7,25
Interrato, parete SB, 5	5A2	70,00	6271,10	118100	1,78	18,83
Interrato, parete SB, 5	5A3	70,31	6292,40	53100	1,76	8,44
Interrato, parete SB, 5	5A4	69,97	6269,69	53400	1,71	8,52
Interrato, parete OA, 2	2A1	69,98	6267,01	62900	1,72	10,04
Interrato, parete OA, 2	2A2	69,93	6242,54	83400	1,69	13,36
Interrato, parete OA, 2	2B1	69,48	6220,81	22000	1,68	3,54
Interrato, parete OA, 4	4A1	70,12	6288,02	27400	1,57	4,36
Interrato, parete OA, 4	4A2	71,38	6396,49	/	1,60	/
Interrato, parete OA, 4	4A3	71,75	6430,57	21900	1,60	3,41
Interrato, parete OA, 4	4A4	70,82	6335,014	57900	1,78	9,14
Interrato, parete OA, 4	4A5	70,27	6297,733	32500	1,77	5,16
Valori medi		70,34	6295,11	56505,07	1,69	8,99

I risultati ottenuti sui campioni di laterizio mostrano una grande variabilità della resistenza a compressione anche tra campioni provenienti dalla stessa carota.

I valori di resistenza a compressione ottenuti sulle carote devono essere trasformati nei corrispondenti valori di resistenza a compressione dei mattoni. Per questo è necessario tenere conto delle differenze di forma e dimensioni.

Si applicano i fattori di forma forniti dalla norma UNI EN 772-1_2002. Assimilando le micro carote a provini cubici di 45 mm di spigolo, e interpolando i valori della tabella, si ottiene il seguente fattore di forma per il passaggio tra la resistenza determinata sulla micro carota e quella che si potrebbe ricavare sottoponendo a prova di compressione l'intero mattone:

$$\delta = \frac{0,825}{0,725} \approx 1,14$$

Conseguentemente, in Tabella 4.3 sono riportati, per le diverse quote, i valori medi dei carichi di rottura, delle tensioni calcolate e della resistenza f_b stimata per i mattoni.

Tab. 4.3: Provini di laterizio: carichi di rottura medi e corrispondenti tensioni, suddivisi per quota.

Posizione	Carico di rottura medio [N]	Tensione di rottura media [N/mm ²]	f_b [N/mm ²]
Quota 30 m	51904	8,21	9,36
Quota 10 m	71780	11,44	13,04
Interrato, parete SB	60729	9,67	11,02
Interrato, parete OA	44000	7,00	7,98
Media nell'interrato	52364	8,34	9,51

Malta

I campioni di malta estratti dalle carote sono stati sottoposti a prove di compressione per doppio punzonamento utilizzando cilindretti in acciaio di 20 mm di diametro (Fig. 4.4).

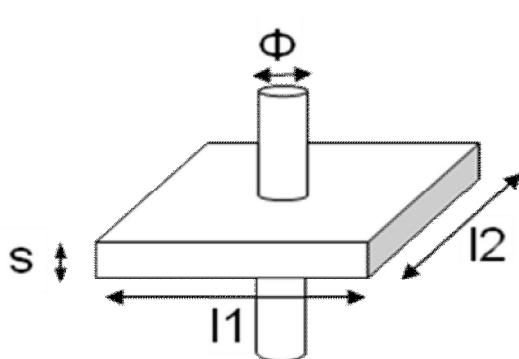


Fig. 4.4: Prova di doppio punzonamento malte: schema di carico ed esecuzione di una prova

Precedenti sperimentazioni hanno evidenziato una buona correlazione tra la resistenza a compressione così determinata e quella determinata attraverso prove standard¹. La curva di correlazione ottenuta ha la seguente equazione:

$$f_m = 0,555 f_{mdp} + 3,068 \quad (\text{Eq. 1})$$

dove f_m e f_{mdp} rappresentano rispettivamente la resistenza derivante dalla prova di doppio punzonamento e quella standard, entrambe espresse in MPa.

In Tabella 4.4, sono riportate le dimensioni dei provini di malta, i carichi di rottura ottenuti dalla prova e la tensione di rottura calcolata dalla prova per doppio punzonamento.

Tab. 4.4: Malta: dimensioni dei campioni, carichi di rottura e tensioni calcolate.

Carota	Provino	spessore [mm]	Carico di rottura [N]	$f_{m,dp}$ [N/mm ²]
Quota 30 m, 4	4m1	9,15	762,5	2,38
Quota 10 m, 2	2m1	14,58	967,5	3,02
Quota 10 m, 2	2m2	13,31	837,5	2,61
Quota 10 m, 2	2m3	16,48	902,5	2,82
Quota 10 m, 3	3m1	14,5	705	2,20
Interrato, parete SB, 1	1m1	14,76	973	3,04 ²
Interrato, parete SB, 1	1m2	13,76	/	/ ³
Interrato, parete SB, 3	3m1	11,14	667,5	2,08
Interrato, parete OA, 1	1m1	14,11	1043	3,26 ¹
Interrato, parete OA, 1	1m2	14,62	/	/ ⁴
Interrato, parete OA, 1	1m3	13,94	/	/ ³
Interrato, parete OA, 1	1m4	14,41	/	/ ³
Interrato, parete OA, 3	3m1	17,23	/	/ ³
Valori medi		14,00	857,31	2,68

¹ Giovanni Pascale, Barbara Bonfiglioli, Camilla Colla, “Tecniche di indagine non distruttiva per la diagnostica strutturale della muratura, alla luce delle recenti normative antisismiche”, Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive, Monitoraggio, Diagnostica, Milano, 13-15 ottobre 2005.

² Le facce del provino non sono ben rettificate né parallele tra loro.

³ La faccia superiore del provino è fortemente inclinata e quindi il campione risulta non provabile.

⁴ Non provabile a causa delle inclusioni presenti.

In Tab. 4.5 sono riportati i valori medi dei carichi di rottura a doppio punzonamento per i campioni di malta alle diverse quote, delle rispettive tensioni ottenute dalle prove di doppio punzonamento e delle resistenze stimate attraverso l'equazione 1.

Tab. 4.5: Campioni di malta: carichi di rottura medi e corrispondenti tensioni, suddivisi per quota

	Carico di rottura medio [N]	$f_{m,dp}$ [N/mm²]	f_m [N/mm²]
Quota 30 m	762,50	2,38	4,39
Quota 10 m	853,13	2,66	4,54
Interrato, parete SB	820,25	2,56	4,49
Interrato, parete OA	1043,00	3,26	4,88
Media nell'interrato	931,63	2,91	4,68

5. Stima delle proprietà meccaniche della muratura

La stima della resistenza a compressione di una muratura a partire da quelle dei materiali costituenti è un problema affrontato da molti ricercatori. Sono disponibili molte relazioni empiriche, derivanti da estese campagne sperimentali. Molte di queste sono riportate in⁵.

Dopo avere eseguito un confronto, si è deciso di adottare la relazione di Ekblad, che si riferisce a murature con giunti in malta di calce.

Si ottengono i valori riportati in Tabella 5.1.

Tab. 5.1: Valori della resistenza media a compressione stimata per le diverse quote, a partire dai valori medi della resistenza dei materiali costituenti

Posizione	f_b [N/mm²]	f_m [N/mm²]	f_{mur} [N/mm²]
Quota 30 m	9,36	4,39	2,86
Quota 10 m	13,04	4,54	3,39
Interrato, parete SB	11,02	4,49	3,11
Interrato, parete OA	7,98	4,88	2,80
Media nell'interrato	9,51	4,68	2,97
Media complessiva	10,18	4,60	3,02

I valori ottenuti possono essere confrontati con quelli che si otterrebbero attraverso il procedimento indicato dalle Norme Tecniche per le Costruzioni 2008, cap. 11, par. 11.10.3.1.2 “Stima della resistenza a compressione”.

Con una resistenza caratteristica del laterizio di 10,0 N/mm² e con una malta M 2,5, si otterrebbe una resistenza caratteristica della muratura pari a 4,1 N/mm². Bisogna però osservare che questa procedura si riferisce principalmente a murature di nuova costruzione, e conseguentemente la sua applicazione a murature antiche è da valutare con molta cautela.

⁵ Carbone, Fiore, Pistone, “Le costruzioni in muratura”, Hoepli, 2001.

I valori ottenuti risultano comunque leggermente superiori a quelli di riferimento forniti all'Allegato 11D dell'Ordinanza 3431 del 2005, Tabella 11 D 1, compresi tra 1,80 e 2,80 N/mm² per muratura in mattoni pieni e malta di calce.

Per tale tipologia di muratura la stessa tabella riporta anche i seguenti valori di riferimento, utili ai fini delle verifiche strutturali:

- modulo di elasticità normale tra 1800 e 2400 N/mm²;
- peso specifico pari a 18 kN/m³.

Per quanto riguarda il modulo di elasticità, una sua valutazione può essere eseguita in base alla relazione che lo lega alla velocità delle onde P e alla massa volumica del materiale.

$$E = \rho V_p^2 \sqrt{\frac{(1+v) \cdot (1-2v)}{(1-v)}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Assumendo per la massa volumica il valore $\rho = 18 \text{ kN/m}^3$ e per il coefficiente di Poisson $v = 0,20$, e operando una riduzione del 30% per passare dal modulo dinamico a quello statico, si ottengono, per velocità delle onde soniche comprese tra 1000 e 2000 m/s, i valori del modulo elastico riportati nella Tabella 5.2.

Tab. 5.2: Valori del modulo di elasticità della muratura valutati per valori della velocità sonica tra 1000 e 2000 m/s.

V_P	E
m/s	N/mm ²
1000	1197
1500	2693
2000	4788

^^^^^^^^^^^^^^^^^

Bologna, 22 novembre 2010

Il responsabile scientifico
della convenzione

Prof. Ing. Giovanni Pascale
Livello 3 CICPND

Il responsabile della
sperimentazione

Dr. Arch. Camilla Colla
Livello 3 CICPND

Il Direttore del DISTART

Prof. Ing. Francesco Ubertini