Committente:



## MONASTERO DI S. MARIA DI CHIARAVALLE Via Sant' Arialdo 102, 20139 - Milano (MI)

Con il contributo di:



MINISTERO PER I BENI E LE ATTIVITA' CULTURALI -Segretariato Regionale per la Lombardia



BANDO "ARTE E CULTURA -BENI CULTURALI A RISCHIO 2017" Fondazione Cariplo

# PROGETTO DEFINITIVO - ESECUTIVO



PROF. ING. LORENZO JURINA

via Trento 1, 20060 - Cassina de'Pecchi (MI) studio.jurina@jurina.it

Collaboratori: Ing. Mattia Almeri Ing. Arch. Andrea A. Bassoli Ing. Alessio Battiston Ing. Alberto Bonetto Ing. Arch. Antonetta Nunziata Ing. Daniele Rampoldi

ING. EDOARDO OLIVIERO RADAELLI via Filzi 13, 20862 - Arcore (MB) edo.radaelli@gmail.com

Collaboratori: Dott. Igor Ceo Dott. Rachele Marchi

Consulenza architettonica e di restauro: ARCH. PAOLA BASSANI via Paolo Maspero 11, 21100 - Varese (VA) paolabassani@libero.it

Elaborato n.: E.04

Oggetto: RELAZIONE INTERPRETATIVA DELLA DIAGNOSTICA

Data: 26 giugno 2019

A NORMA DELLE VIGENTI LEGGI SUI DIRITTI D`AUTORE IL PRESENTE ELABORATO NON PUO` ESSERE RIPRODOTTO NE' DIVULGATO A TERZI SENZA IL CONSENSO DEGLI AUTORI

## 1. Premessa<sup>1</sup>

Nell'organismo edilizio, la struttura rappresenta l'insieme delle componenti destinate a sostenere, ripartire e trasferire le sollecitazioni da un punto ad un altro dello spazio. In generale essa rappresenta il mezzo attraverso cui migrano i carichi dal punto di applicazione al sistema di riferimento costituito dal suolo.

Valutare le condizioni della struttura significa pertanto individuare la capacità attuale di trasferire sollecitazioni, sia di natura statica sia di natura sismica, con adeguati margini di sicurezza.

In questa accezione, valutare il degrado e il dissesto strutturale significa quindi analizzare le diminuzioni nel tempo dei margini di sicurezza globali o locali dovute a fenomeni fisiologici o patologici.

Da un punto di vista molto generale, la valutazione delle condizioni di una struttura comprende tre passaggi principali:

a) una prima fase di anamnesi;

b) una fase di esame obiettivo e di descrizione sintomatologica;

c) una fase di giudizio sullo stato attuale e sulle cause che l'hanno provocato (diagnosi).

## Fase I: ANAMNESI

Un aiuto sostanziale per valutare le condizioni attuali di una struttura viene dalla ricostruzione delle sue vicissitudini storiche.

Estremamente utili risultano pertanto il reperimento della documentazione di progetto, l'acquisizione di notizie relative alla costruzione e agli eventi occorsi negli anni (modifiche, integrazioni, sostituzioni), le sollecitazioni eccezionali cui è stata soggetta.

Questa ricerca storica va accompagnata dall'acquisizione di informazioni sui metodi costruttivi e le tecniche in uso all'epoca delle eventuali aggiunte e sottrazioni.

## Fase II: ESAME OBIETTIVO

Per definire lo stato di fatto di un edificio è necessario estendere l'indagine a tre aspetti fondamentali, ossia:

- aspetti geometrici e cinematici (dimensioni e spostamenti delle varie parti);
- aspetti costitutivi (natura e proprietà dei materiali);
- aspetti statici (natura ed entità delle sollecitazioni).

Supporto essenziale per la diagnosi è il rilievo geometrico dell'edificio.

Accanto a misure di insieme relative alle dimensioni e alla distribuzione degli elementi strutturali e non strutturali, è necessario fornire indicazioni più mirate quali:

- lesioni passanti o non passanti (estensione, ampiezza, progressione);
- strapiombi verticali, avvallamenti dei solai, cedimenti delle fondazioni;
- tracce di interventi o sostituzioni passate;
- aspetto esterno delle componenti strutturali;
- identificazione delle zone di materiale omogeneo e delle inclusioni;
- aspetto degli ammorsamenti e delle giunzioni tra i vari componenti strutturali.

È necessario poi fornire, per ogni zona di materiale omogeneo, una **caratterizzazione meccanica** in termini di resistenza e rigidezza, attraverso mirate indagini diagnostiche.

Infine, la valutazione dell'attuale sicurezza delle strutture richiede che i carichi vengano determinati con precisione.

Servono pertanto i pesi specifici dei materiali per definire il carico permanente delta struttura, una indagine sulle effettive condizioni di uso (per definire i carichi accidentali) ed ancora una ricostruzione delle vicende

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> La diagnosi del sistema strutturale, L. Jurina, Estratto dal volume "Tecnologia del recupero edilizio" a cura di G. Caterina, UTET, 1989

storiche per risalire alle modifiche di uso e di schema strutturale nonché ai fenomeni endogeni (frane, sismi, ecc.) cui l'edificio è stato assoggettato.

## Fase III: DIAGNOSI

In questa fase si inquadrano in modo unitario le osservazioni e i dati acquisiti in precedenza sulla struttura.

Noto lo schema strutturale originario, i materiali ed i carichi, è possibile individuare le zone più sollecitate; note le lesioni, se ne interpreta la natura e si individuano le cause.

Si formula quindi un modello di calcolo per la valutazione di sicurezza attuale.

Va evidenziato come l'obiettivo della diagnosi sia la valutazione del livello di sicurezza della struttura nei confronti di una situazione di esercizio, la quale conduce a scelte relative al "se intervenire", "dove intervenire", "come intervenire" e "quando intervenire".

Quando la struttura è soggetta a un sistema di carichi invariante il problema si presenta relativamente semplice: la struttura ha già dimostrato le sue possibilità e qualche inserimento mirato può aumentare il margine di sicurezza che separa la situazione di esercizio da quella di possibile collasso.

In questi casi la struttura, che è un modello di se stessa, guida il tecnico verso l'intervento ottimale cui la diagnosi deve condurre.

Più complessa è la situazione quando si voglia riqualificare l'edificio storico rispetto alla normativa vigente (sia per carichi verticali che, più frequentemente, per carichi orizzontali sismici).

Lo schema statico, la geometria e i materiali vanno individuati con maggior precisione in quanto si va verso una situazione strutturalmente nuova e potenzialmente pericolosa. L'obiettivo si presenta, in questo caso, più difficile da raggiungere.

## 2. Il percorso della conoscenza per l'Abbazia di Chiaravalle Milanese

La presente relazione interpretativa della diagnostica illustra i risultati ottenuti dalle indagini conoscitive eseguite presso l'Abbazia di Chiaravalle Milanese.

Ci si è ricondotti allo schema descritto nel precedente paragrafo, sviluppato nelle tre fasi di anamnesi, esame obiettivo e diagnostica.

## <u>Anamnesi</u>

Si riporta di seguito un estratto dall'articolo La storia dei restauri dell'abbazia<sup>2</sup> a cura dell'arch. Giuseppe Stolfi. La storia architettonica dell'abbazia di Chiaravalle, come per la gran parte dei monumenti di architettura, è una storia continua di trasformazioni, che si succedono e stratificano nel tempo. Le trasformazioni architettoniche sono di vari generi: un monumento si modifica nel corso della storia per addizioni e accrescimenti, per sottrazioni e rimozioni, per rifacimenti in cui si combinano tanto l'atto di addizione che quello di rimozione.[...] Questa premessa inguadra bene la storia architettonica dell'Abbazia di Chiaravalle, che è scandita da una serie di accrescimenti successivi, riguardanti edifici o parti di edifici dell'articolato complesso monastico, o episodi artistici specialmente significativi che lo hanno arricchito. A partire dalla fondazione dell'Abbazia nel 1135, il primo momento architettonico rilevante è la costruzione della chiesa, che si protrae per vari decenni dalla metà del secolo fino alla consacrazione avvenuta nel 1221, che conclude la prima campagna di lavori: una chiesa che nel lungo corso dell'esecuzione già combina e stratifica apporti diversi, giacché gli innovativi dettami di S.Bernardo si vennero tuttavia a combinare nelle diverse regioni con le singole tradizioni locali europee; e dunque si vedono da un lato la matrice borgognona della casa madre (la "pianta bernardina" a croce, con coro a terminazione rettilinea a transetto a cappelle allineate), dall'altro i modi del romanico milanese (il sistema alternato di sostegni e volte, la costruzione in cotto). Alla chiesa segue il chiostro duecentesco, di partito architettonico d'impronta borgognona, con trifore e volte ad archi acuti. Dall'inizio del Trecento, la primitiva essenzialità del programma architettonico cistercense, secondo i dettami di S. Bernardo, è superata da episodi architettonici e pittorici rilevanti. Sopra il tiburio è innalzata la grande torre nolare, tradizionalmente attribuita all'architetto Francesco Pecorari autore del S.Gottardo a Milano [...]

Ai primi del Quattrocento, per liberalità dell'abate Fontana, vengono edificate la sacrestia innestata nel braccio destro del transetto, e al'ingresso dell'Abbazia la foresteria e la cappella di S. Bernardo, che accoglie anch'essa un'importante decorazione pittorica della stessa epoca. Alla fine del secolo è costruita anche la grande ala dell'incompiuto chiostro grande, attribuita a Bramante. [...]

La storia dei restauri di questo, come di tanti altri monumenti architettonici (che è storia moderna, così come è concetto moderno quello stesso di restauro) è, allora, storia dell'inversione della tendenza sottrattiva, e, di nuovo, del ritorno a un operare secondo modi di accrescimento e aggiunta: non più tuttavia nei termini tradizionali di sostanziale indifferenza ai valori della preesistenza e di aggiornamento al gusto presente, bensì nei termini di un rapporto consapevole con una storia riconosciuta quale valore, così come posti e concettualizzati (peraltro in modo assai vari) dalle moderne dottrine del restauro. [...]

E' infatti nel 1894 che l'Ufficio regionale per la conservazione dei monumenti della Lombardia, diretto da Luca Beltrami, acquista parte degli edifici dell'abbazia dai privati che l'abitavano, e dà inizio al restauro del complesso. Il primo intervento è eseguito da Beltrami che restaura il lato superstite del chiostro, già ridotto ad abitazione ma conservato nell'ossatura originaria, liberandolo dai rimaneggiamenti utilitari e ricostruendo le

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> La storia dei restauri dell'abbazia, G. Stolfi, Soprintendente Belle arti e paesaggio per le province di Lucca e Massa Carrara (già funzionario responsabile per l'Abbazia di Chiaravalle), in Il Sud Milano e l'Abbazia di Chiaravalle: una grande risorsa di storia, di agricoltura e di fede, Milano 2015

parti mancanti: dunque un restauro di ripristino mediante liberazione e limitata integrazione di parti, che nell'attuazione si avvale in gran parte della materia originaria del monumento. Nel 1905 è Gaetano Moretti, successore di Beltrami alla guida dell'Ufficio (che nel 1907 diventa Soprintendenza ai Monumenti), che con Raineri Arcaini pone mano a un intervento di restauro e consolidamento della torre nolare, che fa ampio ricorso a sostituzioni in stile di colonnine e in pietra; e ha un aspetto di notevole interesse storico-metodologico nel tema della proposta rimozione di aggiunte seicentesche alla torre, contrastato da Boito e d'Andrade per motivi di filologia ma infine eseguita.

## Esame obiettivo

La prima ed imprescindibile fase di conoscenza della Torre Nolare ha riguardato gli aspetti geometrici.

A tal proposito è stato eseguito un accurato rilievo laser scanner 3d della Ciribiciaccola e dell'intera chiesa, sia degli esterni che degli interni, a cura della società Laserplan, di Mario Maffeis.

Si rimanda alle tavole di rilievo geometrico R\_01 e R\_02 per le sezioni e piante della Torre Nolare, ricavate dal modello 3D. Di seguito si riportano alcune immagini estratte dalla navigazione 3D.



















L'esame obiettivo è proseguito con l'analisi del <u>quadro fessurativo e dei degradi</u> che interessano la Torre Nolare. Rimandando alle tavole di rilievo del degrado per una analisi dello stato di conservazione, si possono distinguere:

- degradi di tipo strutturale, che si manifestano con lesioni nella muratura, riduzione delle sezioni resistenti delle colonnine degradate, collasso di alcuni elementi in acciaio tra gli archetti dell'ultimo livello;

- degradi di tipo superficiale, prevalentemente legate a presenza di vegetazione, di depositi incoerenti, corrosione, macchie e lacune.

L'accurata campagna diagnostica, descritta nel paragrafo a seguire, ha consentito di caratterizzare le proprietà meccaniche delle strutture mediante prove in situ e di laboratorio e di caratterizzare globalmente il comportamento della Ciribiciaccola, utilizzando prove di tipo dinamico.

Per quanto attiene la terza componente dell'esame obiettivo, ossia i <u>carichi</u>, si rimanda alla relazione di calcolo in cui vengono identificati i carichi statici e dinamici, secondo le vigenti normative.

## **Diagnostica**

I risultati della diagnostica qui sintetizzati si riconducono alle allegate relazioni:

- Indagine diagnostica mediante martinetti piatti, datata 15 settembre 2018, a firma dello scrivente prof.ing. Lorenzo Jurina;

- RdP 271-2018 *Indagini diagnostico conoscitive e prova dinamica ambientale*, datata ottobre 2018, a firma dell'ing. Panzeri di P&P, società di diagnostica incaricata dalla committenza.

La campagna conoscitiva ha previsto l'esecuzione delle seguenti indagini:

- n° 4 prove con martinetto piatto singolo e doppio;

- n° 10 prove soniche, sia di superficie che per trasparenza;

- n° 9 prove petrografiche di laboratorio, di cui 3 eseguite sulle malte, 3 eseguite sul laterizio e 3 sulla pietra delle colonnine;

- n° 1 indagine MASW;

- n° 1 prova dinamica ambientale.

## Caratterizzazione delle murature

Le indagini diagnostiche sulle murature hanno restituito buoni risultati in termini di resistenze.

I valori ottenuti mediante le prove con martinetti piatti doppi hanno fornito valori di resistenza superiori a 2,0 N/mm<sup>2</sup> che, confrontati con i valori sollecitanti da peso proprio ottenuti mediante martinetto piatto singolo e pari a 0,42 N/mm<sup>2</sup>, 0,79 N/mm<sup>2</sup> e 0,92 N/mm<sup>2</sup>, offrono un **adeguato margine di sicurezza**.

I valori delle prove soniche hanno fornito una media pari a 1527 m/s, valore non particolarmente alto se confrontato con murature molto omogenee e compatte (valori nell'ordine dei 3000 m/s), ma nemmeno indicativo di una muratura scadente (valori di 1000 m/s).

PROVA N°	VELOCITA' SONICA MEDIA			
	[m/s]			
1	1540			
2	1931			
3	1535			
4	1705			
5	1548			
6	1380			
7	1167			
8	1436			
9	1201			
10	1826			
MEDIA	1527			

La presenza di alcune possibili disomogeneità e rimaneggiamenti, peraltro riscontrati anche durante la rimozione degli intonaci per l'esecuzione delle prove con martinetto piatto, può essere individuato quale causa di un valore di velocità sonica "intermedia".

Non particolarmente alti anche i valori di modulo elastico, che variano da 375 MPa a 3333 MPa, rispettivamente per i punti n° 1 (torre nolare, parte alta) e n° 4 (muratura alla base, transetto nord).

PROVA N.	MODULI DI DEFORMABILITÀ [MPa]						
	[0.4 – 0.8]	[0.8 – 1.2]	[1.2 – 1.6]	[1.6 – 2.0]	[2.0 – 2.2]	[2.0 – 2.4]	[2.4 – 2.8]
M1B	741	645	455	377			
M2B	1250	685	455	385		294	
M3B	3333	3333	2222	546	303		
M4B	3030	3333	3333	3333		2500	1818

Al fine di determinare la resistenza a taglio della muratura, sono state eseguite n. 3 prove di scorrimento, mediante l'inserimento di un martinetto piatto in un taglio verticale.

Il carico verticale applicato è stato pari a 0,4 MPa per le tre prove.

Il carico orizzontale applicato è stato pari a 0,75MPa per le prove T1 e T2, e di 0,85MPa per la prova T3.

Nonostante le sollecitazioni orizzontali fossero estremamente elevate non si è verificato alcun scorrimento del mattone sul letto di malta.

Solamente nella prova T1 si è verificato il movimento del mattone che ha provocato la rottura a trazione dei mattoni sopra e sotto quello sottoposto a sollecitazione orizzontale con uno scorrimento minimo pari a 0,6mm. Tale fatto è attribuibile alla buona resistenza della malta dei giunti, che impedisce lo scorrimento del laterizio;

ne consegue una buona resistenza a taglio, utile in presenza di carichi orizzontali.

I valori così ottenuti sono stati introdotti nel modello FEM, quali parametri per la calibrazione numerica, opportunamente corretti per i fattori di confidenza da normativa NTC2018.

## Caratterizzazione del suolo

L'indagine MASW eseguita nell'area prospiciente la navata laterale sinistra dell'Abbazia ha restituito un valore di velocità Vs,30 pari a 214 m/s, corrispondente ad un sottosuolo di **categoria "C"**, ossia Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

Per quanto riguarda gli aspetti geologici e di falda relativi alla zona Sud di Milano, si rimanda alla relazione

*Il tema della falda acquifera e delle acque superficiali nella zona del sud Milano,* redatta dalla prof.ssa Laura Scesi del Politecnico di Milano e contenuta negli atti del *convegno II Sud Milano e l'Abbazia di Chiaravalle: una grande risorsa di storia, di agricoltura e di fede,* Milano 2015.

Le variazioni di falda hanno influenzato il comportamento delle pavimentazioni del complesso abbaziale, che da anni mostra rigonfiamenti diffusi. Non si ritiene tuttavia che ciò possa influenzare il comportamento statico e dinamico della Ciribiciaccola, oggetto del presente progetto.

## Caratterizzazione dinamica della torre

Il comportamento modale della Torre Nolare è stato indagato mediante una caratterizzazione dinamica, che ha previsto l'impiego di ben 34 accelerometri. Le misurazioni dell'accelerazione strumentale è stata condotta in assenza di forzante esterna, ma solo con il rumore ambientale.

La registrazione prolungata nel tempo delle accelerazioni e l'elevato numero di strumenti impiegati hanno consentito di ottenere i primi **5 periodi propri** della struttura con un buon livello di accuratezza.

I primi due modi registrati sono di tipo flessionale, i modi 3 e 4 sono di tipo ancora flessionale, ma con andamento ad "S", mentre il quinto modo è di tipo torsionale.

La tabella sottostante riporta le frequenze registrate.

MODO N°	Frequenza [Hz]	
1	1.61	Primario flessionale
2	1.67	Primario flessionale
3	3.08	Secondario flessionale
4	3.15	Secondario flessionale
5	3.33	Torsionale

Si rimanda alla relazione redatta dalla società P&P per ulteriori specifiche sulla strumentazione impiegata, sulle modalità di prova e sulla elaborazione dei dati acquisiti.

Un video esplicativo delle deformate modali è stato prodotto dalla P&P e reso disponibile allo scrivente progettista.

I risultati sono stati impiegati nella calibrazione del modello ad elementi finiti, come meglio esplicitato nella relazione di calcolo strutturale.

Un'ulteriore prova dinamica, nei medesimi punti e con le medesime modalità, verrà replicata ad intervento di consolidamento concluso.

## 3. Conclusioni

La diagnosi preventiva eseguita sulla Torre Nolare dell'Abbazia di Chiaravalle si è rivelata un utile strumento per la definizione della **vulnerabilità strutturale**.

A partire da un accurato rilievo laser scanner, che ha coinvolto non solo la Torre, ma anche la chiesa, è stata ricavata la geometria; indagini diagnostiche in situ e prove di laboratorio hanno caratterizzato meccanicamente la muratura; prove di identificazione dinamica hanno restituito il comportamento modale, fornendo frequenze e modi propri di vibrare.

Sulla base di tali informazioni è stato implementato un modello numerico ad elementi finiti, il quale ha consentito di stabilire il livello di rischio strutturale da sisma della Ciribiciaccola ed ha consentito di verificare l'efficacia degli interventi proposti.

## ALLEGATI



## **RAPPORTO TECNICO DI PROVA**

# Torre Nolare dell'Abbazia Cistercense di Chiaravalle (MI)

## Indagini diagnostico conoscitive e prova dinamica ambientale



p.c.: Studio Prof. Ing. L. Jurina

Documento	Data		Pagine relazione		
RdP-271-2018	Ottobre 2018		4	42	
Revisione	data revisione		Allegati		
-		-	Risultati prove	e petrografiche	
Il Responsabile Paolo Panzeri					

Via Pastrengo, 9 - 24068 Seriate (BG) Tel. 035 32357 ; Fax 035 3235750 www.pepconsultingengineers.it

## INDICE

1.	Pl	REMESSE E SCOPI	
2.	PI	ROVA DINAMICA AMBIENTALE	4
	2.1	ATTREZZATURA DI PROVA E MODALITÀ DI REGISTRAZIONE	4
	2.2	L'ELABORAZIONE DEI DATI	
	2.3	I modi sperimentali individuati	21
3.	IN	DAGINE SISMICA ATTIVA CON METODO MASW	
	3.1	Area di studio	25
	3.2	INDAGINE CONDOTTA E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	
	3.3	CLASSIFICAZIONE DEL SUOLO DI FONDAZIONE	
	3.4	ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI	
4.	IN	DAGINI SONICHE	
	4.1	SONICHE S1	
	4.2	SONICHE S2	
	4.3	SONICHE S3	
	4.4	SONICHE S4	
	4.5	SONICHE S5	
	4.6	SONICHE S6	
	4.7	SONICHE S7	
	4.8	SONICHE S8	
	4.9	SONICHE S9	
	4.10	SONICHE S10	
5.	PI	ROVE PETROGFRAFICHE DI LABORATORIO	

## ALLEGATI:

- RISULTATI PROVE PETROGRAFICHE DI LABORATORIO

## 1. PREMESSE E SCOPI

Il presente rapporto tecnico di prova riferisce in merito alle attività di indagine diagnostico conoscitive condotte sulla Torre Nolare dell'Abbazia Cistercense di Chiaravalle (MI).

La torre Nolare è realizzata in muratura in mattoni pieni in laterizio di altezza totale da terra pari a circa 55 metri.

Le indagini eseguite sono di seguito riportate:

- Prova di caratterizzazione dinamica ambientale ante-intervento.

A seguito di lavori di rinforzo previsti sulla Torre nel 2019 verrà condotta una prova dinamica ambientale post-intervento eseguita in analogia alla prova pre-intervento con strumentazione ricollocata nei medesimi punti

- Indagine sismica attiva con metodo MASW
- Prove soniche sulle murature eseguiti con formazione di percorsi incrociati e presentazione dei risultati su mappe contour
- Prove petrografiche polished section di laboratorio

L'attività è stata svolta per conto dello Studio Prof. Ing. Jurina con il quale sono state concordate le modalità delle indagini in campo. Le prove sono state eseguite dalla P&P Consulting nel mese di settembre 2018. Di seguito si riportano nel dettaglio la descrizione e l'esito delle indagini condotte in sito.



Torre Nolare dell'Abbazia Cistercense di Chiaravalle (MI)

## 2. PROVA DINAMICA AMBIENTALE

#### 2.1 Attrezzatura di prova e modalità di registrazione

Le prove di tipo ambientale sono consistite nella misura delle vibrazioni ambientali, in cui l'eccitazione è data da fattori quali vento, traffico, microtremori, ecc. Viene quindi misurata la sola risposta della torre per poi effettuare, attraverso tecniche di analisi modale operazionale, la stima delle grandezze che caratterizzano la risposta dinamica della struttura.

L'attrezzatura di prova era costituita da:

#### Sensori accelerometrici

Per quanto concerne la caratterizzazione degli accelerometri utilizzati, sono stati impiegati accelerometri ICP 393B12 della PCP Piezotronics, caratterizzati da elevata sensibilità (10 V/g), risoluzione dell'ordine di 8  $\times \mu g$  rms capaci di operare nel campo di frequenza sino a 2000 Hz. Le caratteristiche principali dei sensori utilizzati sono:

• Costruttore:	PCP Piezotronics	(USA)
• Modello:	ICP (M) 393B12	
<ul> <li> Principio di funzionamento:</li> </ul>	piezoelettrico con	elemento sensibile in ceramica
<ul> <li> Campo di misura:</li> </ul>	0,5 g <sub>peak</sub>	$5 (m/s^2)$ peak
• Campo di frequenza (5 %):	$0,15 \div 1000 \text{ Hz}$	
• Campo di frequenza (10 %):	$0,10 \div 2000 \text{ Hz}$	
<ul> <li> Frequenza di risonanza:</li> </ul>	> 12 khz	
• Sensibilità:	10 V/g	1 (V)/(m/s²)
<ul> <li>Sensibilità trasversale:</li> </ul>	< 7 %	
• Risoluzione:	$> 8 \times \mu g \ rms$	80 (µm/s²) rms
• Limite di accelerazione allo shock:	5.000 g	50.000 m/s <sup>2</sup>
• Alimentazione:	18 ÷ 30 Vdc	
<ul> <li> Non linearità ed isteresi:</li> </ul>	$<\!\pm1$ %	
• Massa:	210 grammi	

I punti di misura sono stati accuratamente rilevati in modo tale da potere poi ripetere le prove dinamiche post-intervento con la certezza di ricollocare i sensori nella medesima posizione.

In relazione alla conformazione della struttura da esaminare e al comportamento dinamico atteso sono stati selezionati i seguenti livelli da monitorare:



Sono stati monitorati complessivamente n. 34 punti ai diversi livelli della Torre Nolare, come schematicamente illustrato nei disegni riportati di seguito:





## Livello Punta Campanile (+54,8 m)



Ubicazione sensori di misura ai diversi livelli della Torre

Tabella configurazione sensori di misura						
Nome	Livello	<b>Posizione/Direzione</b>	Nome	Livello	<b>Posizione/Direzione</b>	
1X	B / +17,5 m	1 / X	10X	F/+34,3 m	10 / X	
1Y	B / +17,5 m	1 / Y	10Y	F/+34,3 m	10 / Y	
2X	B / +17,5 m	2 / X	11X	G / +34,3 m	11 / X	
2Y	B / +17,5 m	2 / Y	11Y	G / +34,3 m	11 / Y	
3X	B / +17,5 m	3 / X	12X	G / +34,3 m	12 / X	
3Y	B / +17,5 m	3 / Y	12Y	G / +34,3 m	12 / Y	
4X	B / +17,5 m	4 / X	13X	H / +42,8 m	13 / X	
4Y	B / +17,5 m	4 / Y	13Y	H / +42,8 m	13 / Y	
5X	D/+26,4 m	5 / X	14X	H / +42,8 m	14 / X	
5Y	D/+26,4 m	5 / Y	14Y	H / +42,8 m	14 / Y	
6X	D/+26,4 m	6 / X	15X	H / +42,8 m	15 / X	
6Y	D/+26,4 m	6 / Y	15Y	H / +42,8 m	15 / Y	
7X	D/+26,4 m	7 / X	16X	H / +42,8 m	16 / X	
7Y	D/+26,4 m	7 / Y	16Y	H / +42,8 m	16 / Y	
8X	D/+26,4 m	8 / X	17X	H / +54,8 m	17 / X	
8Y	D/+26,4 m	8 / Y	17Y	H / +54,8 m	17 / Y	
9X	F/+34,3 m	9 / X				
9Y	F/+34,3 m	9 / Y				

Di seguito sono riportate alcune foto degli accelerometri installati:



Sensori di misura accelerometrici installati sulla Torre Nolare

### Sistema di registrazione

I singoli trasduttori sono stati collegati in cascata ad un "condizionatore di segnale", ad un filtro antialiasing con frequenza di taglio pari a 20 Hz e infine al sistema di registrazione vero e proprio.

Il monitoraggio è stato effettuato nei giorni  $10 \div 13/09/2018$ . Il periodo di monitoraggio è risultato adeguato per assicurare la validità statistica alle successive elaborazioni.

Sistema di acquisizione basato su standard Quantum X della HBM a 24 bit in grado di assicurare un'elevata risoluzione nella registrazione di segnali di ampiezza anche di molto piccola quali quelli determinati dall'eccitazione ambientale.

Tutti i sensori di misura sono stati acquisti contemporaneamente mediante specifico sistema di acquisizione dinamico multicanale.

La frequenza di campionamento è stata assunta pari a fs=100 Hz e i dati sono stati registrati in file consecutivi di 30 minuti (1800 sec – 180000 punti).

## 2.2 L'elaborazione dei dati

I dati registrati sono stati elaborati con il programma: "Operational Modal Analysis " sviluppato da LMS che permette l'individuazione del numero di modi presenti nell'intervallo di frequenza analizzato, la stima dei parametri modali con la tecnica nota come Polimax e la successiva individuazione di alcuni indici per una valutazione dell'affidabilità delle stime effettuate.

L'elaborazione è stata sviluppata secondo i seguenti passi.

## A) Scelta dell'intervallo di registrazione da utilizzare per le elaborazioni

Poiché l'eccitazione ambientale presenta le caratteristiche tipiche di un segnale random non stazionario con la sovrapposizione in alcuni casi di transitori di tipo impulsivo dovuti ad attività antropica, è stata dapprima effettuata una verifica della qualità delle registrazioni per una scelta degli intervalli duranti i quali l'eccitazione mostrava maggior regolarità e fosse comunque di intensità sufficiente ad eccitare i modi principali della struttura.

Di seguito a titolo esemplificativo vengono illustrati i grafici dei rilievi sperimentali relativi ad una tipica registrazione da 30 minuti che caratterizzata da una buona risposta delle posizioni di misura per tutto il periodo di osservazione.



















#### B) Calcolo della matrice della Densità Spettrale di Potenza

La matrice delle densità spettrali è il punto di partenza per l'utilizzo dell'algoritmo Polimax; fra le diverse tecniche disponibili per il calcolo della densità spettrale di un processo random, avendo a disposizione un numero elevato di campioni, si è fatto uso del metodo classico che determina la densità spettrale come media delle densità spettrali di ogni singolo campione.

Pertanto il calcolo è stato eseguito nel modo seguente:

- applicazione ad ogni singolo campione della finestra di Hanning
- calcolo della trasformata di Fourier discreta di ogni campione definita come:

$$DFT_x^i = \sum_{n=0}^{N-1} x_n^i \cdot e^{-\frac{2fi}{N}kn}$$
, k = 0, ..., N-1

• calcolo della densità spettrale del campione i-esimo

$$PSD_{xx}^{i} = \frac{1}{T} \cdot (DFT_{x}^{i})^{*} \cdot DFT_{x}^{i} \quad \text{densit} \text{a spettrale di potenza diretta per la time history } \mathbf{x}_{n}$$
$$PSD_{xy}^{i} = \frac{1}{T} \cdot (DFT_{x}^{i})^{*} \cdot DFT_{y}^{i} \text{ densit} \text{a spettrale di potenza incrociata tra le time history } \mathbf{x}_{n} \text{ e } \mathbf{y}_{n}$$
essendo :

 $(DFT_x)^*$  e  $(DFT_y)^*$  i complessi coniugati rispettivamente di DFT\_x e DFT\_y

• calcolo della densità spettrale dell'intero processo

$$PSD_{xx} = \frac{1}{N} \sum_{i} PSD_{xx}^{i} \qquad PSD_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i} PSD_{xy}^{i}$$

Poiché il calcolo della trasformata di Fourier è stato eseguito utilizzando un numero di punti Np= 4096 sui 180000 disponibili l'effettiva durata della registrazione è risultata essere di 41 s e conseguentemente la risoluzione in frequenza è stata pari a 0.002 Hz, valore del tutto adeguato per cogliere in modo accurato il comportamento dinamico della struttura.

### C) L'identificazione modale con il metodo Polimax

Il metodo utilizzato per la determinazione dei parametri modali, sviluppato da LMS, è noto come "PoliMax Modal Parameter Estimation Method" e permette, a partire dalla conoscenza degli spettri della risposta, di determinare i poli (frequenze proprie); tali parametri vengono ottenuti attraverso la minimizzazione di una opportuna funzione errore una volta scelto l'ordine (e quindi il numero di poli) con cui può essere decomposta la matrice delle densità spettrali.

In pratica il processo di individuazione dei modi procede partendo da modelli che hanno un ordine molto superiore rispetto ai modi presumibilmente presenti nel campo di frequenza esplorato ed escludendo poi attraverso il ricorso al diagramma di stabilizzazione i modi spuri (introdotti cioè dal metodo di calcolo) da quelli fisici.

Tale scelta si opera ricalcolando i parametri di modelli il cui ordine viene di volta in volta diminuito; nel corso di questo processo soltanto i poli effettivi del sistema rimangono stabili.

Le figure seguenti mostrano a titolo d'esempio i diagrammi di stabilizzazione relativi ai tratti di interesse e i poli stabili scelti quindi come modi della struttura.



Diagramma di stabilizzazione da 0 a 20 Hz



Di seguito sono individuati i modi principali della struttura che sono risultati essere stabili:

Diagramma di stabilizzazione tra 0 Hz – 5 Hz ( $f_1$ =1,61 Hz;  $f_2$ =1,67 Hz;  $f_3$ =3,08 Hz;  $f_4$ =3,15 Hz;  $f_5$ =3,33 Hz)

I primi modi di interesse individuati sono collocati rispettivamente alle seguenti frequenze:  $f_1=1,61$  Hz;  $f_2=1,67$  Hz;  $f_3=3,08$  Hz;  $f_4=3,15$  Hz e  $f_5=3,33$  Hz.

Nel campo di frequenze superiore a 5 Hz non sono stati individuati modi di vibrare stabili.

#### D) Validazione dei dati

Il grado di confidenza sui valori dei parametri modali estratti con il metodo Polimax può essere valutato tramite il calcolo di una serie di indici; fra questi il più significativo è l'indicatore MAC.

#### Modal Assurance Criterion (MAC)

L'indicatore MAC per due vettori complessi X e Y assume un valore prossimo ad 1 se fra i due vettori esiste una relazione lineare mentre assume un valore circa 0 per vettori linearmente indipendenti; applicato alle forme modali stimate permette dunque una verifica della loro ortogonalità

Nel caso in oggetto l'indicatore MAC è stato calcolato per tutte le coppie di modi individuati ed è diagrammato sotto forma di matrice nella figura seguente avendo normalizzato a 100 il valore dell'indice lungo la diagonale principale; i valori dell'indicatore sono invece riportati nella tabella A

	Mode 1 (1,61 Hz)	Mode 2 (1,67 Hz)	Mode 3 (3,08 Hz)	Mode 4 (3,15 Hz)	Mode 5 (3,33 Hz)
Mode 1 (1,61 Hz)	100	0	3	28	0
Mode 2 (1,67 Hz)	0	100	35	4	0
Mode 3 (3,08 Hz)	3	35	100	2	0
Mode 4 (3,15 Hz)	28	4	2	100	1
Mode 5 (3,33 Hz)	0	0	0	1	100

Tabella – Valori dell'indicatore AutoMac

I valori assunti dai termini fuori diagonale assumono valori modesti del tutto accettabili per i primi n.5 modi individuati.

## 2.3 I modi sperimentali individuati

Il processo di analisi della risposta ambientale della Torre Nolare ha portato ad individuare i primi n. 5 modi principali. La tabella successiva riporta la frequenze propria di ciascun modo individuato, oltre a descrivere in modo indicativo la deformata (Direzione X: Est-Ovest ; Direzione Y: Nord-Sud).

Modo	Frequenza	Deformata indicativa
N°. 1	1,61 Hz	Modo proprio di vibrare di natura flessionale in prevalente direzione X.
N°. 2	1,67 Hz	Modo proprio di vibrare di natura flessionale in prevalente direzione Y (direzione ortogonale rispetto al modo n.1)
N°. 3	3,08 Hz	Modo proprio di vibrare di natura flessionale in prevalente direzione Y con una inversione di segno in elevazione
N°. 4	3,15 Hz	Modo proprio di vibrare di natura flessionale in prevalente direzione X con una inversione di segno in elevazione (direzione ortogonale rispetto al modo n.3)
N°. 5	3,33 Hz	Modo proprio di vibrare di natura torsionale attorno all'asse verticale Z

## Tabella: Risultati dell'analisi modale

Di seguito vengono riportate le forme modali individuate in precedenza. In un DVD allegato vengono forniti filmati di animazione delle forme modali.



Modo 2 – Frequenza 1,67 Hz



Ottobre 2018 RdP-271-2018



Modo 3 – Frequenza 3,08 Hz

Modo 4 – Frequenza 3,15 Hz






# 3. INDAGINE SISMICA ATTIVA CON METODO MASW

Nell'ambito della campagna di indagini in oggetto è stata eseguita anche un'indagini sismica di tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), finalizzata alla determinazione dei parametri sismici del terreno.

Scopo principale dell'indagine è stato quello di caratterizzare il terreno tramite l'analisi del parametro fisico della velocità sismica delle onde superficiali nei primi 30 m di substrato, avendo come obiettivi:

- caratterizzazione sismica del substrato investigato
- calcolo del parametro di *Vs30* lungo i profili

#### 3.1 Area di studio

Con riferimento allo schema grafico riportato di seguito, l'area di indagine è costituita da un'area verde limitrofa alla struttura oggetto di indagini. Lo stendimento, di lunghezza pari a 46 metri, è stato collocato in un'area che presentava superficie sufficientemente ampia ed il più possibile libera da disturbi quali pozzetti, tubature interrate e vibrazioni indotte da fattori esterni (traffico stradale).



# 3.2 Indagine condotta e strumentazione utilizzata

Profilo	Lunghezza	Distanza	Record length	Sample interval
sismico	stendimento* (m)	intergeofonica (m)	(s)	(ms)
MASW	46	2	1	

L'indagine sismica condotta con tecnica MASW viene riportata nella tabella seguente.

\*La lunghezza è riferita ai metri coperti dai geofoni impiegati e non considera le energizzazioni effettuate al di fuori degli stessi



Stendimento dei n. 24 geofoni di misura e fase di energizzazione

Di seguito viene elencata la strumentazione utilizzata per l'esecuzione dell'indagine sismica ed un'immagine relativa al sistema di acquisizione.

Strumentazione	Quantità
Sismografo Echo 24/2010 24 canali - 24 bit	1
Cavo multipolare	2
Geofoni 4,5 Hz	24
Hammer switch	1
Mazza strumentata da 7 Kg	1

Le tecniche per la determinazione della velocità delle onde sismiche di taglio sono diverse e si distinguono principalmente tra tecniche di tipo diretto o indiretto e tra tecniche di tipo attivo e di tipo passivo. Nessuna tecnica è in grado di garantire la completa affidabilità nella determinazione dei parametri dei terreni presenti nel sottosuolo. Occorre pertanto appoggiarsi ad informazioni di tipo stratigrafico per poter interpretare correttamente le informazioni deducibili dall'interpretazione dei dati delle campagne d'indagine.

#### 3.3 Classificazione del suolo di fondazione

La recente normativa nazionale in materia di Norme Tecniche delle Costruzioni subentrata nell'ottobre 2005 all'Ordinanza 3274 del Presidente del Consiglio dei Ministri, e più recentemente aggiornata nel gennaio 2018, ha introdotto tra l'altro una nuova normativa tecnica in materia di progettazione antisismica. La nuova normativa nazionale introduce una classificazione dei suoli per la definizione dell'azione sismica di progetto. Tale classificazione distingue tra cinque categorie principali, suddivise dalla A alla E.

**Categoria A**: Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da **valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s**, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.

**Categoria B**: Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

**Categoria C**: Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da **valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s**.

**Categoria D**: Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 m/s e 180 m/s.

**Categoria E**: Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30m.

Tale classificazione si basa principalmente sulla conoscenza del valore del parametro  $V_{s30}$  che rappresenta il valore medio della velocità di propagazione delle onde di taglio (S) entro i primi 30 metri di profondità. Il valore di  $V_{s30}$  viene calcolato mediante la seguente espressione:

$$Vs_{30} = \underline{30}_{(i=1,N)}h/V_{i}$$

dove  $h_i e V_i$  indicano rispettivamente lo spessore in metri e la velocità delle onde di taglio in m/sec (per deformazioni di taglio  $< 10^{-6}$ , per deformazioni piccole e nel campo delle deformazioni elastiche) dello

strato i-esimo per un totale degli N-strati riconosciuti nei primi 30 metri di sottosuolo a partire dalla superficie.

La determinazione del valore delle onde di taglio negli strati superficiali, insieme ad una dettagliata ricostruzione stratigrafica del sottosuolo, è ritenuta fondamentale per valutare sia gli effetti legati allo scuotimento indotto dal sisma sul terreno (fenomeni di liquefazione, fenomeni di dilatanza o di addensamento, instabilità di versanti, collasso di cavità sotterranee) che la conseguente risposta del sottosuolo (fenomeni di amplificazione sismica legati sia ad effetti morfologici che litologici, presenza di faglie attive).

#### 3.4 Analisi dei risultati ottenuti

Nel caso specifico, relativamente all'indagine MASW condotta vengono di seguito riportate:

- lo spettro nel dominio f k di potenza e picking manuale della curva di dispersione;
- una tabella riportante lo spessore dei vari strati ed i relativi valori di Vs al variare della profondità di indagine;
- il profilo del modello sintetico utilizzato per approssimare la curva di dispersione sperimentale a quella calcolata.

L'indagine MASW, pur con l'approssimazione congenita del metodo, consente di approfondire le informazioni sul modello stratigrafico del sito in esame. In particolare, l'analisi delle onde superficiali è in grado di definire una stratificazione anche all'interno del terreno.



Spettro di potenza e picking manuale della curva di dispersione

Strato	Prof. [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
1	0.00	3.01	167
2	3.01	19.70	217
3	22.71	inf.	234

Tabella dei valori di velocità delle onde S (Vs) in funzione dello spessore degli strati riscontrati

Per quanto riguarda l'area in esame i risultati ottenuti mostrano un valore di riferimento di **Vs30** pari a **214 m/s** equivalente ad un suolo di fondazione di **tipo C**: questa categoria racchiude "Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s".



Profilo del modello sintetico di calcolo

Si ricorda infine che l'eventuale presenza di informazioni di tipo stratigrafico potrebbe consentire di affinare ulteriormente la modellazione, per meglio interpretare le informazioni deducibili dall'analisi dei dati della presente campagna d'indagine.

### 4. INDAGINI SONICHE

L'applicazione del metodo si basa sostanzialmente sulla misura della velocità di propagazione di impulsi meccanici nel materiale costitutivo della struttura fra due punti: quello in cui è posto l'emettitore (generatore degli impulsi) e quello in cui è posto il ricevitore. Scopo dei rilievi è valutare la "velocità virtuale o apparente" di propagazione degli impulsi applicati alla struttura (intesa come rapporto fra la distanza geometrica tra i punti di rilievo e tempo di transito misurato), e da essa informazioni sulle caratteristiche di deformabilità ed omogeneità del mezzo attraversato.

Il metodo si basa sul fatto che le modalità di propagazione di un segnale sonico impulsivo quali la velocità, l'ampiezza e la frequenza, sono funzione sia delle proprietà elastiche sia dello stato di integrità del mezzo attraversato. In particolare, la velocità di propagazione degli impulsi in un mezzo è funzione delle caratteristiche elastiche del mezzo attraversato (modulo di elasticità e coefficiente di Poisson dinamici) e della sua densità, mentre eventuali disomogeneità quali fessure, zone degradate e cavità variano la velocità di propagazione assorbendo parzialmente l'onda di vibrazione.

Il rilievo consiste nel produrre impulsi di vibrazioni meccaniche attraverso un trasduttore (sonda trasmittente) mantenuto in contatto con una superficie del mezzo in esame. Dopo aver attraversato un percorso di lunghezza nota L, l'impulso di vibrazioni è convertito in un segnale elettrico da un secondo trasduttore e un circuito elettronico permette la misura del tempo di transito (T) dell'impulso. La velocità di propagazione (V) dell'impulso – essendo noto L - viene, dunque, ricavata attraverso la relazione:

#### V = L/T

Operando in accordo alla norma UNI EN 12504-4:2005I, i rilievi sono stati condotti secondo le diverse modalità di trasmissione:

trasmissione diretta del segnale quando la stazione trasmittente e ricevente si trovano sulle due superfici opposte della parete;

trasmissione indiretta del segnale quando la stazione trasmittente e ricevente sono collocate sulla stessa superficie di prova ma distanziate tra loro.

Per condurre le prove è stata utilizzata una apparecchiatura ultrasonica composta da una centralina di acquisizione dati e da una serie di sensori piezoelettrici con trasmettitore ad alta potenza (>1,6 Kv) o dotata di martello strumentato, per poter effettuare misure del tempo di propagazione delle onde di compressione (onde P) in molti tipi di materiali, anche con scarse caratteristiche di propagazione e velocità. La potenza di trasmissione degli impulsi, regolabile via software tramite cursore, e l'elevata sensibilità dei ricevitori piezoelettrici di tipo attivo, con frequenza propria 55 KHz (oppure 20 KHz), consentono di effettuare misure sia in laboratorio, su provini anche di grandi dimensioni, in materiali quali calcestruzzo, rocce, materiali plastici, vetroresina, legno, ecc..., sia presso cantieri, per indagini in sito su pilastri e travi in calcestru zzo o materiali lapidei, edifici civili o monumentali.

Complessivamente sono state condotte n. 10 prove soniche.

Successivamente vengono analizzati i punti d'indagine con una tabella che ricostruisce la maglia di prova per ognuno di essi.

# 4.1 SONICHE S1

Le prove soniche S1 sono state eseguite sul muro a piano terra del transetto Nord. La prova è consistita nell'esecuzione di misure indirette posizionando le sonde in coppie di punti mobili su un reticolo 20x20 cm coprendo un'area di  $1m^2$ .

				Quo	ta					
Punto Contour	Posizione sonde	0 cm	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm			
1	<b>A-B</b>	1748	1405	1330	1096	877	1073			
2	В-С	1295	2315	2427	1445	1295	1147			
3	C-D	1811	1582	895	988	1232	1121			
4	D-E	1689	2212	2212	1748	1748	2368			
5	E-F	2032	1163	1534	1174	1534	1263			
6	F-G	1880	1445	1582	2315	1404	1073			
VALORE M	EDIO			1540	m/s					
DEVIAZIONE SZ	TANDARD	446 m/s								
COEFF. DI VAR	RIAZIONE	28.9 %								







Area di prova (riquadro azzurro /  $1m \times 1m$ ) posizionato a circa 125 cm da terra e a circa 85 cm dallo spigolo del muro di sinistra.

# 4.2 SONICHE S2

Le prove soniche S2 sono state eseguite sulla muratura al livello B sopra l'arco superiore. La prova è consistita nell'esecuzione di misure indirette posizionando le sonde in coppie di punti mobili su un reticolo 20x20 cm coprendo un'area di  $1m^2$ .

	_			Quo	ta							
Punto Contour	Posizione sonde	0 cm	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm					
1	<b>A-B</b>	2212	2190	1880	1695	1854	1634					
2	B-C	1695	1404	1780	1355	1538	1603					
3	С-Д	1689	1582	2315	1719	1705	2551					
4	D-E	1876	2212	2119	1999	2651	1574					
5	E-F	1953	2032	1953	2032	2551	2653					
6	F-G	1643	2243	1874	2315	1812	1614					
VALOR	E MEDIO	1931 m/s										
DEVIAZION	E STANDARD	346 m/s										
COEFF. DI	VARIAZIONE	17.9 %										

2700-







# 4.3 SONICHE S3

Le prove soniche S3 sono state eseguite sulla muratura al livello B in corrispondenza del pilastro d'angolo lato Nord vero Est. La prova è consistita nell'esecuzione di misure indirette posizionando le sonde in coppie di punti mobili su un reticolo 20x20 cm.

							Quota						
Punto	Posizione	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
Contour	sonde	cm	ст	ст	ст	ст	ст	ст	ст	ст	ст	ст	
1	A-B	2711	1664	1702	1815	1639	1591	1307	1996	947	1292	1269	
2	C-D	1232	1748	1582	2551	609	1488	1405	1534	1504	1445	1182	
3	D-E	1409	2119	875	1330	2159	1368	1751	1582	1111	1404	1338	
VALOR	E MEDIO	1535 m/s											
DEV. ST	<b>CANDARD</b>						432 m/s						
COEFF	. DI VAR.	28.2 %											









# 4.4 SONICHE S4

Le prove soniche S4 sono state eseguite sul pilastrino del livello C. La prova è consistita nell'esecuzione di misure dirette posizionando le sonde in coppie di punti mobili sulla verticale da 15 cm a 165 cm.

							Quota						
Punto Contour	Posizione sonde	15 cm	30 cm	45 cm	60 cm	75 cm	90 cm	15 cm	120 cm	135 cm	150 cm	165 cm	
1	1-1	1893	1904	1738	1845	1794	1539	1491	1613	1603	1835	1987	
2	2-2	1701(*)	1701	1779	1546	1629	1720	1629	1639	1695	1813	1407	
VALOR	E MEDIO	1705 m/s											
DEV. ST	TANDARD					1	145 m/s						
COEFF	. DI VAR.	8.5 %											

(\*) non è stato possibile misurare il valore in sito per difficoltà di posizionamento della sonda. Pertanto è stato assegnato arbitrariamente un valore di un punto misurato in prossimità





Schema pilastrino a quota 165 cm



# 4.5 SONICHE S5

Le prove soniche S5 sono state eseguite sul pilastro lato Ovest al livello D. La prova è consistita nell'esecuzione di misure dirette posizionando le sonde in coppie di punti mobili sui lati opposti del pilastro e sulla verticale a partire da 0 cm a 135 cm.

	_				9	Quota							
Punto Contour	Posizione sonde	0 cm	15 cm	30 cm	45 cm	60 cm	75 cm	90 cm	15 cm	120 cm	135 cm		
1	<i>1-1</i>	1792	1577	1952	1651	1733	1543	1625	1763	1855	1288		
2	2-2	1556 1677		1762	1386	1371	1553	1531	1577	844	1034		
3	<i>3-3</i> 1556 (*) 1677 (*)		1762 (*)	1446	1319	1657	1134	1446	1625	1758			
VALOR	E MEDIO	1548 m/s											
DEV. ST	ANDARD	244 m/s											
COEFF	. DI VAR.				1	5.8 %							

(\*) non è stato possibile misurare il valore in sito per difficoltà di posizionamento della sonda. Pertanto è stato assegnato arbitrariamente un valore di un punto misurato in prossimità







# 4.6 SONICHE S6

Le prove soniche S6 sono state eseguite sul pilastro lato Est al livello D. La prova è consistita nell'esecuzione di misure dirette posizionando le sonde in coppie di punti mobili sui lati opposti del pilastro e sulla verticale a partire da 0 cm a 135 cm.

					ļ	Quota							
Punto Contour	Posizione sonde	0 cm	15 cm	30 cm	45 cm	60 cm	75 cm	90 cm	15 cm	120 cm	135 cm		
1	1-1	1625	1733	1432	1389	1353	788	2078	1738	1442	1303		
2	2-2	1553	919	1535	1607	1199	1076	1227	1407	1087	774		
3	3-3	<b>3-3</b> 1553 (*) 919 (*) 1535 (*)		1535 (*)	1717	1612	1188	1217	1319	1509	1577		
VALOR	E MEDIO	1380 m/s											
DEV. ST	ANDARD	302 m/s											
COEFF	. DI VAR.				2	21.9 %							

(\*) non è stato possibile misurare il valore in sito per difficoltà di posizionamento della sonda. Pertanto è stato assegnato arbitrariamente un valore di un punto misurato in prossimità



# 4.7 SONICHE S7

Le prove soniche S7 sono state eseguite sul pilastro posizionato sul lato Sud verso Ovest al livello F. La prova è consistita nell'esecuzione di misure dirette posizionando le sonde in coppie di punti mobili sui lati opposti del pilastro e sulla verticale a partire da 15 cm a 165 cm.

							Quota						
Punto	Posizione	15	30	45	60	75	90	15	120	135	150	165	
Contour	sonde	ст	ст	ст	ст	ст	ст	ст	ст	ст	ст	ст	
1	1-1	1586	1605	1113	1183	1243	1372	1381	1553	994	1568	1434	
2	2-2	1125	1268	1211	918	998	951	868	1110	1188	1158	1210	
3	3-3	1107	1015	1453	1200	936	741	775	1093	968	1167	1027	
VALORI	E MEDIO	1167 m/s											
DEV. STANDARD							229 m/s						
COEFF. DI VAR.		19.7 %											



# 4.8 SONICHE S8

Le prove soniche S8 sono state eseguite sul pilastro posizionato sul lato Est verso Sud al livello G. La prova è consistita nell'esecuzione di misure dirette posizionando le sonde in coppie di punti mobili sui lati opposti del pilastro e sulla verticale a partire da 20 cm a 200 cm.

						Qu	ota						
Punto Contour	Posizione sonde	20 cm	40	60 am	80 am	100 cm	120 cm	140 cm	160 cm	180 cm	200		
Comour	sonuc	Cm	Cm	CM	Cm	Cm	Cm	Cm	Cm	Cm	Cm		
1	1-1	1661	1879	1571	1737	2085	1820	1879	1813	1555	1529		
2	2-2	1962	1420	1334	1165	1355	1664	1493	1698	1420	1222		
3	3-3	922	1198	856	1176	998	973	1141	910	1284	1356		
VALOR	E MEDIO	1436 m/s											
DEV. ST	<b>CANDARD</b>	340 m/s											
COEFF	. DI VAR.	23.7 %											







# 4.9 SONICHE S9

Le prove soniche S9 sono state eseguite sul pilastro posizionato sul lato Sud verso Est al livello G. La prova è consistita nell'esecuzione di misure dirette posizionando le sonde in coppie di punti mobili sui lati opposti del pilastro e sulla verticale a partire da 20 cm a 200 cm

		Quota											
Punto Contour	Posizione sonde	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	120 cm	140 cm	160 cm	180 cm	200 cm		
Comour	sonue	Cm	Cm	CM	Cm	CM	Cm	CM	Cm	CM	Cm		
1	1-1	1634	1121	1034	1329	1555	1372	1570	1842	1339	1006		
2	2-2	1358	1034	966	932	1197	1056	888	1036	1022	1072		
3	3-3	1330	1240	1113	1086	1107	1256	1030	1086	1107	1299		
VALOR	E MEDIO	1201 m/s											
DEV. ST	<b>CANDARD</b>	226 m/s											
COEFF	. DI VAR.	18.8 %											



# 4.10 SONICHE S10

Le prove soniche S10 sono state eseguite sulla parete tronco-conica al livello H. La prova è consistita nell'esecuzione di misure dirette posizionando le sonde in coppie di punti mobili sui lati opposti della parete sulla verticale a partire da 0 cm a 62 cm (sp. parete 27,5 cm).

	Quota								
Punto	0	12	24	36	48	60			
Contour	ст	ст	ст	ст	ст	ст			
1	1723	2092	1781	2492	2262	1446			
2	1577	2176	2152	1635	2176	1414			
3	1782	1693	1878	1542	1286	1414			
4	1508	1878	1475	1444	1541	2175			
5	2323	2247	1829	1781	1987	1750			
6	2247	1577	1948	2046	1577	1878			
VALORE MEDIO			1826	ō m/s					
DEV. STANDARD	314 m/s								
COEFF. DI VAR.	17.2 %								



# 5. PROVE PETROGFRAFICHE DI LABORATORIO

In sito sono stati eseguiti prelievi che hanno riguardato n. 3 campioni di malta (livello G – livello D e livello B facciata Nord), n. 3 campioni di mattoni (due a livello H e uno a livello D), n. 3 campioni di pietra delle colonne (livello H – livello G e livello D).

In allegato sono riportati i risultati delle prove petrografiche di laboratorio tipo polished section.

# Allegato 1

# Prove petrografiche di laboratorio

# INDICE

1.	]	PREN	MESSA	3
	1.1	СА	MPIONAMENTO	3
	1.2	PR	OGRAMMA D'INDAGINE	3
2.		RISU	ILTATI ANALITICI	3
	2.1	AN	VALISI TERMOGRAVIMETRICA (TG-DTG)	3
	2.2	AN	VALISI TERMICA DIFFERENZIALE (DTA)	4
	2.3	Po	UISHED SECTIONS OBSERVATIONS	5
		2.3.1	Analisi delle malte	5
		2.3.2	Analisi della pietre	6
		2.3.3	Analisi dei laterizi	7
3.		ANAI	LISI CRITICA DEI RISULTATI	8
	3.1	Ľ'A	ANALISI DELLE MALTE	8
	3.2	L'A	ANALISI DELLE PIETRE	0
	3.3	Ľ'A	ANALISI DEI LATERIZI	0
4.		CON	CLUSIONI1	0

# 1. PREMESSA

Il presente rapporto tecnico riferisce sui risultati delle indagini eseguite su tre campioni di malta di allettamento, tre di pietra e tre di mattone, prelevati dalla Torre Nolare dell'Abbazia Cistercense di Milano Chiaravalle.

#### 1.1 Campionamento

I campioni, prelevati dal Committente, sono stati identificati come segue:

- CHIA-1:malta di allettamento Livello B facciata nord
- CHIA-2:malta di allettamento Livello D
- CHIA-3:malta di allettamento Livello G
- CHIA-4:pietra Livello D
- CHIA-5:pietra Livello G
- CHIA-6:pietra Livello H
- CHIA-7:mattone Livello D
- CHIA-8:mattone Livello H
- CHIA-9:mattone Livello H

#### 1.2 Programma d'indagine

Sui campioni sono state eseguite le seguenti analisi:

- analisi petrografica su polished sections.

Limitatamente ai campioni di malta di allettamento, sono state eseguite:

- analisi termogravimetrica TG-DTG
- analisi termica differenziale DTA.

#### 2. RISULTATI ANALITICI

## 2.1 Analisi termogravimetrica (TG-DTG)

L'analisi termogravimetrica misura le variazioni di peso del campione al crescere della temperatura, nell'intervallo tra 50°C e 850°C e fornisce informazioni sulla stabilità termica dei composti che costituiscono il campione nello stesso intervallo termico. I risultati sono rappresentati sui diagrammi termogravimetrici.

Attraverso i termogrammi è possibile valutare il numero e la natura degli eventi termici, la temperatura alla quale avvengono, la loro entità e se gli eventi sono endotermici o esotermici. La comparazione con curve campione, fornisce notizie semi-quantitative sulla natura chimica delle molecole coinvolte dall'evento termico.

Le analisi hanno determinato la presenza delle sostanze indicate nella tabella seguente, mentre i termogrammi relativi sono riportati alle figure  $1\div3$ .

Campione	umidità [%]	gesso [%]	H2O da sil. idrati [%]	Ca(OH)2 [%]	Sostanza organica [%]	ettringite [%]	Carbonato basico di Mg [%]	CaCO3 [%]	Residuo [%]
CHIA-1	0.41	2.60	20.22	0.00	0.00	2.68	1.40	29.86	50.06
CHIA-2	0.56	0.81	3.55	0.62	0.00	0.00	2.02	20.19	69.41
CHIA-3	1.34	0.81	4.96	0.53	0.00	0.00	0.95	22.26	65.18
media	0.77	1.40	9.58	0.38	0.00	0.89	1.46	24.10	61.55

# Tabella 1: Analisi termogravimetriche

Dall'esame dei campioni di adesivo dello strato interno emerge quanto segue:

- L'umidità varia da 0.41% a 1.34% con una media di 0.77%
- Il gesso varia da 0.81% a 2.60% con una media di 1.40%
- L'acqua da silicati idrati varia da 4,19% a 7.38% con una media di 5.52%
- Il carbonato di calcio varia da 20.19% a 29.86% con una media di 24.10%
- Il residuo varia da 50.25% a 69.84% con una media di 61.78%
- La calce libera varia da n.d. a 0.62% con una media di 0.38%
- Il carbonato basico di magnesio varia da 0.44% a 0.82% con una media di 0.89%.

#### 2.2 Analisi termica differenziale (DTA)

L'analisi termica differenziale (DTA) determina la temperatura alla quale avvengono gli eventi, ne stabilisce se sono endotermici o esotermici. La comparazione con curve campione, fornisce notizie sulla natura chimica delle molecole coinvolte dall'evento termico. L'analisi DTA è stata eseguita sui soli campioni di malta di allettamento, in associazione con la termogravimetria, nell'intervallo di temperatura tra 50°C e 850°C.

I risultati conseguiti sono riassunti di seguito, mentre i termogrammi relativi sono riportate nelle figure 4÷6.

# Campione CHIA-1

- ettringite (tracce)
- gesso (tracce)
- carbonato basico di Mg (tracce)
- calce libera
- quarzo
- argilla
- calcari

- gesso
- carbonato basico di Mg (tracce)
- calce libera
- quarzo
- argilla
- calcari

#### **Campione CHIA-3**

- gesso
- carbonato basico di Mg (tracce)
- calce libera
- quarzo
- argilla
- calcari.

#### 2.3 Polished Sections Observations

L'analisi in luce riflessa delle malte è stata eseguita secondo la norma ASTM 4353 - Polished Section Observation, al microscopio ottico a luce riflessa polarizzata, su una faccia del campione resa piana e levigata, preparata secondo la raccomandazione Normal 12/83, utilizzando un microscopio polarizzatore a luce riflessa LEITZ METALLUX 3.

Di seguito vengono riportate le principali osservazioni.

#### 2.3.1 Analisi delle malte

Le schede riassuntive, corredate della documentazione fotografica, sono riportate alle figure 7÷12.

#### Campione CHIA-1

Malta a granulometria arenacea media, con alta densità e distribuzione disomogenea dell'aggregato.

L'aggregato, ad alta sfericità subarrotondato, a composizione eminentemente silicatica, è di origine fluviale. Si riconoscono frammenti di quarzo e rocce silicatiche - molto subordinati carbonati.

La massa di fondo, di colore bianco, è di natura cementizia, con tessitura micritica e struttura disomogenea. L'adesione tra matrice ed aggregato è buona. Si osservano numerosi granuli di cemento non idratati.

La porosità è media rappresentata da bollosità sferica e rare fratture.

Condizioni di conservazione: mediocri.

Il campione può essere classificato: MALTA DI CEMENTO (PROBABILE RISARCITURA RECENTE).

Malta a granulometria arenacea grossolana, con alta densità e distribuzione disomogenea dell'aggregato.

L'aggregato, ad alta sfericità subarrotondato, a composizione silicatica, è di origine fluviale. Si riconoscono frammenti di quarzo e rocce metamorfiche - rari carbonati – rare arenarie e siltiti.

La massa di fondo, di colore bianco, è di natura carbonatica, con tessitura micritica e struttura disomogenea. L'adesione tra matrice ed aggregato è discreta. Si osservano noduli di calce di 0.2÷0.5 mm di diametro.

La porosità è bassa rappresentata da bollosità lobata.

Condizioni di conservazione: mediocri.

Il campione può essere classificato: MALTA DI CALCE.

#### Campione CHIA-3

Malta a granulometria conglomeratica molto fine, con media densità e distribuzione disomogenea dell'aggregato.

L'aggregato, ad alta sfericità subarrotondato, a composizione silicatica, è di origine fluviale. Si riconoscono frammenti di quarzo e rocce metamorfiche - rari carbonati – rare arenarie e siltiti.

La massa di fondo, di colore beige, è di natura carbonatica, con tessitura micritica e struttura disomogenea. L'adesione tra matrice ed aggregato è discreta. Si osservano noduli di calce di 0.2÷0.5 mm di diametro.

La porosità è bassa rappresentata da bollosità lobata e rare fratture aperte.

Condizioni di conservazione: mediocri.

Il campione può essere classificato: MALTA DI CALCE.

#### 2.3.2 Analisi della pietre

Sono stai analizzati tre campioni di pietra. Le schede riassuntive, corredate della documentazione fotografica, sono riportate alle figure 13÷18.

#### Campione CHIA-4

#### CALCARE CRISTALLINO

Roccia di origine metamorfica, costituita da cristalli isogranulari (dimensioni dei granoblasti 20÷45 µm) di calcite spatica, derivante dalla ricristallizzazione della calcite di rocce calcaree. Struttura cristalloblastica saccaroide. Tessitura poligonale massiva, indotta da temperature di metamorfismo elevate.

Sono presenti rari nuclei di ossidi di ferro. La porosità, alta per un marmo saccaroide, è costituita da vuoti sub millimetrici rivestiti di cristalli di calcite.

Stato di conservazione del campione: discreto.

#### CALCARE CRISTALLINO

Roccia di origine metamorfica, costituita da cristalli isogranulari (dimensioni dei granoblasti 20÷ $30 \mu$ m) di calcite. Struttura cristalloblastica saccaroide. Tessitura poligonale massiva. Compatta.

Sulla superficie si osserva la deposizione di granuli di pulviscolo atmosferico.

Sono presenti, dispersi nella massa, rari microcristalli di galena e rari nuclei di ossidi di ferro. Si osservano "vene" di calcite microcristallina.

Stato di conservazione del campione: discreto.

#### Campione CHIA-6

#### CALCARE CRISTALLINO

Roccia di origine metamorfica, costituita da cristalli isogranulari (dimensioni dei granoblasti 20÷30 µm) di calcite. Struttura cristalloblastica saccaroide. Tessitura poligonale massiva. Porosità non evidente.

Si rileva una microfratturazione superficiale, sub parallela alla superficie, che interessa uno spessore non inferiore a  $1.5\div2$  mm. Sulla superficie e nelle fratture si osserva la deposizione di granuli di pulviscolo atmosferico.

Sono presenti, dispersi nella massa, alcuni microcristalli di galena e rari nuclei di ossidi di ferro.

Stato di conservazione del campione: Il campione esaminato è alterato superficialmente per circa 1.5÷2 mm e in condizioni mediocri in profondità.

#### 2.3.3 Analisi dei laterizi

Sono stati esaminati tre campioni di laterizio. Le schede riassuntive, corredate della documentazione fotografica, sono riportate alle figure 19÷22.

# Campione CHIA-7

Lo scheletro del campione esaminato ha densità media, ad alta sfericità subangoloso, è costituito essenzialmente da frammenti di quarzo - lamelle di mica - subordinati frammenti di feldspato - rari frammenti di mattoni precedenti. La granulometria è arenacea molto fine e la distribuzione è disomogenea. La massa di fondo è omogenea, di colore rosso mattone medio a tessitura colloforme. La porosità è media, costituita da vuoti di forma lobata e da numerose fratture di ritiro.

Condizioni di conservazione: discrete.

Lo scheletro del campione esaminato ha densità media, ad alta sfericità subangoloso, è costituito essenzialmente da frammenti di quarzo - lamelle di mica - subordinati frammenti di feldspato - rari frammenti di mattoni precedenti. La granulometria è arenacea media e la distribuzione è disomogenea. La massa di fondo è omogenea, di colore rosso mattone chiaro a tessitura colloforme. La porosità è bassa, costituita da vuoti di forma sferica. Sulla superficie, si osserva uno strato millimetrico alterato, caratterizzato essenzialmente da decolorazione.

Condizioni di conservazione: buone.

# Campione CHIA-9

Lo scheletro del campione esaminato ha densità alta, ad alta sfericità subangoloso, è costituito essenzialmente da frammenti di quarzo - lamelle di mica - subordinati frammenti di feldspato - rari frammenti di mattoni precedenti. La granulometria è arenacea fine e la distribuzione è disomogenea. La massa di fondo è omogenea, di colore rosso mattone scuro a tessitura colloforme. La porosità è bassa, costituita da vuoti di forma sferica. Sulla superficie, si osserva uno strato millimetrico decolorato. Condizioni di conservazione: buone.

# 3. ANALISI CRITICA DEI RISULTATI

Le indagini, oggetto di questa relazione, hanno riguardato tre campioni di malta di allettamento, tre di pietra e tre di mattone, prelevati dalla Torre Nolare dell'Abbazia Cistercense di Milano Chiaravalle, ed è stata finalizzata a determinarne la composizione e lo stato di conservazione.

Di seguito si propone un'interpretazione critica dei risultati.

#### 3.1 L'analisi delle malte

Le analisi hanno stabilito che i campioni appartengo a due diverse tipologie, come risulta evidente nel diagramma 1 seguente, nel quale si correlano il calcio carbonato totale Vs. il residuo.



Il primo tipo, rappresentato dal campione CHIA-1, è di una malta a granulometria arenacea media, composta da aggregato di origine fluviale, a composizione eminentemente silicatica, e legante di natura cementizia, come dimostrato dai numerosi granuli di cemento non idratati osservati. Il dosaggio di cemento, stimato dalla quantità di acqua legata ai CSH, è di circa il 20.7%, pari a circa 450 kg/mc. Il campione, ritenuto in mediocri condizioni di conservazione a causa di una quantità eccessiva di gesso, appartiene ad una risarcitura recente.

Il secondo tipo di malta è rappresentato dai campioni CHIA-2 e 3, che, visti i punti di prelievo descritti dalla Committente, appartengono a due diversi periodi.

Il campione CHIA-2 è di una malta, con la matrice di colore bianco, a granulometria arenacea grossolana, con alta densità dell'aggregato, composta con sabbia silicatica e calce. La presenza di silicati idrati di calcio stabilisce che la calce ha natura idraulica.

Dal contenuto acqua da silicati idrati, dalla densità dell'aggregato (analisi modale) e dal contenuto di carbonato di calcio attribuibile al legante è possibile stimare l'indice di idraulicità della calce, che per questo campione è di 0.19.

Il campione CHIA-3 rappresenta una malta di colore beige, a granulometria conglomeratica molto fine. L'aggregato, a media densità, è di fiume, a composizione silicatica e il legante è a base di calce idraulica, come dimostrato dalla presenza di silicati idrati di calcio. E' stato stimato l'indice di idraulicità, che vale 0.24. Il colore beige della matrice è attribuito a piccole dispersioni di ossidi di ferro.

Il diagramma 2, nel quale si correla l'indice di idraulicità Vs. acqua da silicati idrati, si mostra che la calce usata nei due campioni è classificabile come calce mediamente idraulica.



I valori di calcio carbonato attribuibile al legante e il contenuto d'acqua da silicati idrati permettono di ricostruire la formula compositiva dei due campioni, che risulta essere di circa il 18% per CHIA-2 e del 17% per CHIA-3. La quantità di legante usata nei due casi, molto simile, equivale a un dosaggio di 380÷400 kg/mc.

#### 3.2 L'analisi delle pietre

L'analisi petrografica ha determinato che i campioni di pietra esaminati sono di Calcare cristallino, o marmo propriamente detto, una roccia di origine metamorfica, costituita da cristalli isogranulari (dimensioni dei granoblasti 20÷30 µm) di calcite, con struttura cristalloblastica saccaroide e tessitura poligonale massiva

Dispersi nella massa, sono stati osservati rari microcristalli di galena, nuclei di ossidi di ferro e "vene" di calcite microcristallina secondaria.

Le condizioni di conservazione sono mediamente discrete, salvo i fenomeni di microfratturazione superficiale osservati nel campione CHIA-6.

#### 3.3 L'analisi dei laterizi

I campioni esaminati presentano uno scheletro costituito essenzialmente da frammenti di quarzo, residui di rocce silicatiche (lamelle di mica, frammenti di feldspato) e rari frammenti di mattoni precedenti, ad alta sfericità subangolosi. La granulometria dello scheletro è arenacea molto fine e la distribuzione è disomogenea. La massa di fondo è omogenea, di colore rosso mattone con tonalità da rosso chiaro a rosso scuro. La porosità è media, costituita da vuoti di forma lobata. Nel campione CHIA-9 si osservano numerose fratture di ritiro.

La superficie dei campioni CHIA-8 e 9 è alterata per uno spessore di qualche millimetro. L'alterazione consiste essenzialmente nella decolorazione della massa di fondo e non sembra interessare l'integrità del mattone.

#### 4. CONCLUSIONI

Le analisi eseguite su nove campioni, prelevati dalla Torre Nolare dell'Abbazia di Chiaravalle, dei quali tre sono di malta di allettamento, tre di pietra e tre di mattone, hanno portato ai seguenti risultati.

- Dei tre campioni di malta due sono a base di calce e uno e a matrice cementizia.
- Il campione CHIA-1, di natura cementizia, è formato con sabbia di fiume, a granulometria arenacea media e composizione eminentemente silicatica e cemento, stimato in circa il 20.7%, pari a circa 450 kg/mc. Il campione è in mediocri condizioni di conservazione.
- I campioni CHIA-2 e 3, che appartengono a due periodi diversi, sono a base di calce idraulica e sabbia di fiume a composizione silicatica.
- Il campione CHIA-2 è costituito da un aggregato a granulometria arenacea grossolana e composizione silicatica e calce con indice di idraulicità 0.19, dosata in circa il 18%, pari a un dosaggio di 380÷400 kg/mc. Il campione è in discrete condizioni di conservazione. La matrice è di colore bianco.
- Il campione CHIA-3 è costituito da un aggregato a granulometria conglomeratica molto fine e composizione silicatica e calce con indice di idraulicità 0.24, dosata in circa il 18%. Il campione è in discrete condizioni di conservazione. La matrice è di colore beige.

- I due campioni differiscono essenzialmente per la granulometria dell'aggregato, per l'indice di idraulicità e per il colore della matrice, mentre la formulazione è simile.
- I campioni CHIA-4, 5 e 6 sono di calcare cristallino (marmo propriamente detto). Le condizioni di conservazione sono generalmente discrete. Solo sulla superficie di CHIA-6 si osserva uno strato plurimillimetrico microfratturato.

I campioni di mattone, che sulla base del colore, risultano cotti a temperatura adeguata, non presentano alterazioni significative. Le fratture di ritiro, osservate nel campione CHIA-7, si sono formate durante l'essiccazione dell'argilla e non sono derivate da fenomeni deteriogeni.

# ANALISI TERMOGRAVIMETRICA

CHIA-1

termogravimma Campione



FIGURA 1

# ANALISI TERMOGRAVIMETRICA

CHIA-2

termogravimma Campione



FIGURA 2

# ANALISI TERMOGRAVIMETRICA

CHIA-3

termogravimma Campione



FIGURA 3

# ANALISI TERMICA DIFFERENZIALE

CHIA-1

termogramma Campione



### ANALISI TERMICA DIFFERENZIALE

CHIA-2

termogramma Campione

Abbazia Cisterc	elaborato da	eseguito da	data emiss.	rev.
Chiaravalle (Mi				0



# ANALISI TERMICA DIFFERENZIALE

# termogramma Campione CHIA-3

rev.	data emiss.	eseguito da	elaborato da	Abbazia Cistercens
0				Chiaravalle (Milano


#### ANALISI PETROGRAFICA

scheda riassuntiva Campione CHIA-1

rev.	data emiss.	eseguito da	elaborato da	Abbazia Cistercense
0				Chiaravalle (Milano)



Luce riflessa ; 110x al vero Visione generale della sezione. Luce riflessa ; 270x al vero Granuli di cemento

Campione: CHIA-1 Classificazione: Stato di conservazione

Malta di calce mediocri

eminent. silicatica Frammenti di quarzo carbonati arenacea sfericità arrotondamento disomogenea colore: cementizia disomogenea	silicati e rocce silicatiche - media alta subarrotondato bianco	molto subordinati 0.5-0.25mm
Frammenti di quarzo carbonati arenacea sfericità arrotondamento disomogenea colore: cementizia disomogenea	e rocce silicatiche - media alta subarrotondato bianco	molto subordinati 0.5-0.25mm
arenacea sfericità arrotondamento disomogenea colore: cementizia disomogenea	media alta subarrotondato bianco	0.5-0.25mm
sfericità arrotondamento disomogenea colore: cementizia disomogenea	alta subarrotondato bianco	)
arrotondamento disomogenea colore: cementizia disomogenea	subarrotondato	)
disomogenea colore: cementizia disomogenea	bianco	
colore: cementizia disomogenea	bianco	
cementizia disomogenea		
disomogenea		
micritica		<4µm
di cemento		numerosi
	buona	
	media	20-40%
	matrice	
bollosità		sferica
fratture	aperte	rare
e		
ł	bollosità fratture	bollosità fratture aperte te

Campione CHIA-1

Abbazia Cistercer	elaborato da	eseguito da	data emiss.	rev.
Chiaravalle (Mila				0



#### Luce riflessa; 150x al vero Vuoti sferici



Luce riflessa; 700x al vero Granulo grossolano di cemento

#### ANALISI PETROGRAFICA

scheda riassuntiva Campione CHIA-2

rev.	data emiss.	eseguito da	elaborato da	Abbazia Cistercense
0				Chiaravalle (Milano)



Luce riflessa ; 70x al vero Visione generale della sezione. Luce riflessa ; 270x al vero Nodulo di calce carbonatata

Campione: CHIA-2 Classificazione: Stato di conservazione

Malta di calce mediocre

	addensamento	•	alto	50%
	composizione	silicatica	silicati	>90%
Descrizione	litologia	Frammenti di quarzo e rare arenarie e siltiti	rocce metamorfiche -	rari carbonati -
den aggregato	granulometria	arenacea	grossolana	1-0.5mm
	forma	sfericità	alta	
	Ioma	arrotondamento	subarrotondato	
	distribuzione	disomogenea		
	aspetto	colore:	bianco	
	natura	carbonatica		
Descrizione della	struttura	disomogenea		
massa di fondo	tessitura	micritica		<4µm
	noduli	di calce	Ømm	0.2÷0.5
	adesione		discreta	
	quantità		bassa	<20%
Porosità	origine		matrice	
	forma dei pori	bollosità		lobata
Note				

Campione

CHIA-2

rev.	data emiss.	eseguito da	elaborato da	Abbazia Cistercense
0				Chiaravalle (Milano)



Luce riflessa; 150x al vero Fratturazione diffusa della matrice.



Luce riflessa; 350x al vero Nodulo di calce ricristallizzato

#### ANALISI PETROGRAFICA

scheda riassuntiva Campione CHIA-3

rev.	data emiss.	eseguito da	elaborato da	Abbazia Cistercense
0				Chiaravalle (Milano)



Luce riflessa ; 110x al vero Visione generale della sezione. Luce riflessa ; 270x al vero Frattura bordiera ad un frammento

#### Campione: CHIA-3 Classificazione: Stato di conservazione

Malta di calce mediocri

	addensamento		medio	30%
	composizione	silicatica	silicati	>90%
Descrizione	litologia	Frammenti di quarzo e rare arenarie e siltiti	e rocce metamorfiche	- rari carbonati -
den aggregato	granulometria	Conglomeratica	molto fine	4-2mm
	forma	sfericità	alta	
	Ioma	arrotondamento	subarrotondato	
	distribuzione	disomogenea		
	aspetto	colore:	beige	
	natura	carbonatica		-
Descrizione della	struttura	disomogenea		
massa di fondo	tessitura	micritica		<4µm
	noduli	di calce	Ømm	0.2÷0.5
	adesione		discreta	
	quantità		media	20-40%
Porosità	origine		matrice	
FUIUSILA	forma dai pari	bollosità		lobata
	ionna dei pon	fratture	aperte	rare
Note				
	•			

CHIA-3

Campione

Abbazia Cistercense	elaborato da	eseguito da	data emiss.	rev.
Chiaravalle (Milano)				0



Luce riflessa; 350x al vero Nodulo di calce ricristallizzato e microscopici granuli di ossidi di ferro.

# POLISHED SECTION OBSERVATION Campione CHIA-4

Abbazia Cistercense	elaborato da	eseguito da	data emiss.	rev.
Chiaravalle (Milano)				0



Luce riflessa ; 150x al vero Visione generale della sezione.

#### CALCARE CRISTALLINO

Roccia di origine metamorfica, costituita da cristalli isogranulari (dimensioni dei granoblasti 20÷45 μm) di calcite spatica, derivante dalla ricristallizzazione della calcite di rocce calcaree. Struttura cristalloblastica saccaroide. Tessitura poligonale massiva, indotta da temperature di metamorfismo elevate. Sono presenti rari nuclei di ossidi di ferro.

La porosità, alta per un marmo saccaroide, è costituita da vuoti primari sub millimetrici rivestiti di cristalli di calcite.

Stato di conservazione del campione: discreto.



Luce riflessa ; 350x al vero Una geode con cristalli di calcite

Campione

CHIA-4



Luce riflessa; 350x al vero Inclusioni ferrose. In basso una piccola geode



Luce riflessa; 350x al vero Fratture e vuoti.

# POLISHED SECTION OBSERVATION Campione CHIA-5

eseguito da el	da elaborato da



Luce riflessa ; 150x al vero Visione generale della sezione.

#### CALCARE CRISTALLINO

Roccia di origine metamorfica, costituita da cristalli isogranulari (dimensioni dei granoblasti 20÷30 µm) di calcite. Struttura cristalloblastica saccaroide. Tessitura poligonale massiva. Compatta.

Sulla superficie si osserva la deposizione di granuli di pulviscolo atmosferico.

Sono presenti, dispersi nella massa, rari microcristalli di galena e rari nuclei di ossidi di ferro. Si osservano "vene" di calcite microcristallina.

Stato di conservazione del campione: discreto

Luce riflessa; 350x al vero L'immagine a falsi colori mostra una vena di calcite ricristallizzata e cristalli di galena



Campione

CHIA-5

rev.	data emiss.	eseguito da	elaborato da	Abbazia Cistercense
0				Chiaravalle (Milano)



Luce riflessa; 350x al vero L'immagine a falsi colori evidenzia la tessitura microcristallina e le impurità del marmo-In alto alcuni cristalli di galena.

# POLISHED SECTION OBSERVATION Campione CHIA-6

Abbazia Cistercer	elaborato da	eseguito da	data emiss.	rev.
Chiaravalle (Milan				0



Luce riflessa ; 150x al vero Visione generale della sezione. Si osservano alcuni nuclei di ossidi di Fe.

#### CALCARE CRISTALLINO

Roccia di origine metamorfica, costituita da cristalli isogranulari (dimensioni dei granoblasti 20÷30 µm) di calcite. Struttura cristalloblastica saccaroide. Tessitura poligonale massiva.

Si rileva una microfratturazione superficiale, sub parallela alla superficie, che interessa uno spessore non inferiore a 1.5÷2 mm. Sulla superficie e nelle fratture si osserva la deposizione di granuli di pulviscolo atmosferico.

Sono presenti, dispersi nella massa, alcuni microcristalli di galena e rari noclei di ossidi di ferro.

Stato di conservazione del campione: Il campione esaminato è alterato superficialmente per circa 1.5÷2 mm e in condizioni mediocri in profondità.

Luce trasmessa; 110x al vero Serie di microfratture sub parallele alla superficie e piccoli depositi di pulviscolo..



Campione CHIA-6

 rev.
 data emiss.
 eseguito da
 elaborato da

 0

 0



#### Luce riflessa; 350x al vero Microcristalli di galena

Luce riflessa; 350x al vero Tessitura micritica isometrica del marmo

### ANALISI PETROGRAFICA

scheda riassuntiva Campione CHIA-7

rev.	data emiss.	eseguito da	elaborato da	Abbazia Cistercense
0				Chiaravalle (Milano)



Luce riflessa ; 110x al vero Visione generale della sezione. Luce riflessa ; 70x al vero fratture di ritiro

Campione: CHIA-7 Classificazione: Stato di conservazione

laterizio discreto

	addensamento		medio	30%
	composizione	silicatica	silicati	>90%
Descrizione dello	litologia	frammenti di quarzo - lar feldspato - rari framment	melle di mica - subordir ti di mattoni precedenti	nati frammenti di
Scheletio	granulometria	arenacea	m.fine	125-60µm
	forma	sfericità	alta	
	Ionna	arrotondamento	subangoloso	
	distribuzione	disomogenea		
	aspetto	colore:	rosso mattone medio	
Descrizione della	struttura	disomogenea		
massa di fondo	tessitura	colloforme		
	adesione		mediocre	
	quantità		media	20-40%
	origino		bordo dei clasti	
Porosità	ongine		matrice	
	forma dei pori	bollosità	Øμm	lobata
		fratture	di ritiro	numerose
Note				

### ANALISI PETROGRAFICA

scheda riassuntiva Campione CHIA-8

rev.	data emiss.	eseguito da	elaborato da	Abbazia Cistercense
0				Chiaravalle (Milano)



Luce riflessa ; 70x al vero Visione generale della sezione. Luce riflessa ; 70x al vero Alterazione cromatica superficiale

Campione:	CHIA-8	
Classificazione:		I
Stato di conserva	azione	I

laterizio buono

	addensamento		medio	30%
	composizione	silicatica	silicati	>90%
Descrizione dello	litologia	frammenti di quarzo - lan feldspato - rari framment	nelle di mica - subordin i di mattoni precedenti	ati frammenti di
Scheletto	granulometria	arenacea	media	0.5-0.25mm
	formo	sfericità	alta	
	Ioma	arrotondamento	subangoloso	
	distribuzione	disomogenea		
	aspetto	colore:	rosso mattone chiaro	
Descrizione della	struttura	omogenea	·	
massa di fondo	tessitura	colloforme		
	adesione		buona	
	quantità		bassa	<20%
Porosità	origine		matrice	
	forma dei pori	bollosità	Øμm	sferica
Note	Alterazione superfic	iale.		

Campione CHIA-8

Abbazia Cistercer	elaborato da	eseguito da	data emiss.	rev.
Chiaravalle (Milar				0



Luce riflessa; 100x al vero Frammento di un laterizio precedente



Luce riflessa; 100x al vero Vuoto sferico

#### ANALISI PETROGRAFICA

scheda riassuntiva Campione CHIA-9

rev.	data emiss.	eseguito da	elaborato da	Abbazia Cistercense
0				Chiaravalle (Milano)



Luce riflessa ; 110x al vero Visione generale della sezione. Frammenti di laterizi precedenti

Luce riflessa ; 70x al vero Alterazione superficiale

Campione: CHIA-9 Classificazione: Stato di conservazione

laterizio buono

	addensamento		alto	50%
	composizione	silicatica	silicati	>90%
Descrizione dello	litologia	frammenti di quarzo - la feldspato - rari framme	amelle di mica - subordir nti di mattoni precedenti	nati frammenti di
scheletro	granulometria	arenacea	fine	200-125µm
		efericità	alta	
	forma	Siencita	bassa	
		arrotondamento	subangoloso	
	distribuzione	omogenea		
	aspetto a Nicol x	colore:	rosso mattone scuro	
Descrizione della	struttura	omogenea		
massa di fondo	tessitura	colloforme		
	adesione		buona	
	quantità		bassa	<20%
Porosità	origine		matrice	
	forma dei pori	bollosità	Ø µm	sferica
Note Alterazione superficiale		siale.		

# **ABBAZIA DI CHIARAVALLE - MILANO**

# INDAGINE DIAGNOSTICA MEDIANTE MARTINETTI PIATTI

Prof. Ing. Lorenzo Jurina



#### PREMESSA

La presente relazione riporta i risultati dell'indagine eseguita sulle strutture murarie dell'Abbazia di Chiaravalle nel comune di Milano.

Le indagini diagnostiche sono state finalizzate alla determinazione dello stato di sollecitazione, delle caratteristiche meccaniche e della resistenza al taglio della muratura.

Dette indagini sono state articolate secondo il programma qui sinteticamente indicato:

- prove con un martinetto piatto per la determinazione dello stato di sollecitazione delle strutture murarie. (n. 4);
- prove con due martinetti piatti paralleli per la determinazione delle caratteristiche di deformabilità delle strutture murarie. (n. 4);
- prove di caratterizzazione della resistenza al taglio della muratura. (n. 3)

Le attività oggetto del presente rapporto tecnico sono state effettuate nel mese di settembre 2018 le modalità di esecuzione e l'ubicazione delle prove, dettagliatamente indicate ai punti successivi, sono state definite in accordo il Committente.



#### DESCRIZIONI DELLE TECNICHE DI PROVA

#### 1.1. Prove con martinetto piatto per la determinazione dello stato di sollecitazione

La prova con martinetto piatto consente di rilevare lo stato di sollecitazione locale presente nelle strutture murarie, misurando la variazione dello stato tensionale, in un punto della muratura, provocata da un taglio piano di limitate dimensioni.

Il taglio viene eseguito in direzione normale alla superficie della muratura in corrispondenza di un corso di malta. Il rilascio delle tensioni provoca una parziale chiusura del taglio che viene rilevata tramite misure di convergenza fra coppie di punti predisposti in posizione simmetrica rispetto al taglio stesso.

Viene quindi inserito, all'interno del taglio, uno speciale martinetto piatto, realizzato mediante sottili lamiere di acciaio saldate, collegato ad un circuito idraulico, in cui la pressione viene gradualmente aumentata fino ad annullare la deformazione misurata in fase di esecuzione del taglio. In queste condizioni la pressione all'interno del martinetto è uguale alla sollecitazione preesistente nella muratura in direzione normale al piano del martinetto, a meno di una costante sperimentale che tiene conto del rapporto tra l'area del martinetto e l'area del taglio e della rigidezza intrinseca di ogni martinetto.

I martinetti utilizzati nelle prove hanno una geometria a settore rettangolare di dimensioni 400x200x6 mm per le prove M1 e M3, dimensioni 240x120x6 mm per la prova M2, dimensioni 340,255x4 mm a settore semicircolare per la prova M4. Il taglio per l'inserimento dei martinetti è stato realizzato con l'utilizzo di trapano con punta da 8 mm realizzando una serie di fori affiancati, la finitura del taglio viene eseguita con utensili manuali per i martinetti a settore rettangolare, con moto troncatrice con disco diamantato per i martinetti semicircolari.

Le misure di convergenza sono state effettuate utilizzando un estensimetro meccanico rimovibile ed una serie di basi di misura poste a cavallo del taglio e realizzate incollando sulla muratura piastrine di riferimento in acciaio invar, del diametro di 5 mm, poste a distanza di 200 mm l'una dall'altra.



Fasi di esecuzione della prova con martinetto piatto singolo Lettura prima del taglio – Esec. del taglio – lettura dopo il taglio



Fasi di esecuzione della prova con martinetto piatto singolo Ins. del martinetto – ripristino del carico

# 1.2. Prove con martinetti piatti per la determinazione delle caratteristiche di deformabilità

La prova con due martinetti piatti paralleli consente di determinare in modo non distruttivo le caratteristiche di deformabilità di un campione rappresentativo di muratura.

Tale prova viene effettuata in corrispondenza di un punto di indagine con martinetto piatto e consiste nel realizzare un secondo taglio, parallelo al primo, entro cui viene inserito un martinetto, in modo da delimitare un campione di muratura di dimensioni pari a circa 400x600x200 mm, 240x300x120mm e 340x600x255mm. I due martinetti piatti paralleli consentono di applicare al campione interposto uno stato di sollecitazione monoassiale e di eseguire più cicli di carico e scarico ripetuti fino a differenti livelli di carico prefissati.

Le misure di deformabilità verticale ed orizzontale del campione vengono rilevate mediante l'impiego di un estensimetro meccanico rimovibile, utilizzando, rispettivamente, tre basi di misura verticali ed una base di misura orizzontale, di lunghezza 400. Il tipo di martinetto utilizzato, le modalità di esecuzione del taglio ed il tipo di basi di misura corrispondono a quanto descritto al precedente punto.



Fase di esecuzione della prova con due martinetti piatti

#### 1.3. Determinazione della resistenza al taglio dei giunti di malta

Con la prova di scorrimento o di taglio, si determina la resistenza al taglio dei giunti di malta della muratura in presenza di carichi verticali. La prova consiste nel verificare la forza occorrente per far scorrere un mattone nel piano dei giunti di malta orizzontale ed in presenza del carico verticale.

La determinazione della tensione di taglio o scorrimento nelle murature a mattone si effettua mediante l'utilizzo di un martinetto piatto di dimensioni pari 120x50x6cm.

Si sceglie un mattone che deve rimanere integro, su un lato si crea uno spazio (mediante l'asportazione della malta nel giunto verticale) per l'inserimento del martinetto mentre sul lato opposto si crea un ulteriore spazio sempre mediante l'asportazione della malta dal giunto verticale in modo da isolare il mattone per permetterne lo scorrimento.

Lo scorrimento del mattone è misurato da un sensore posto a cavallo del giunto libero opposto a quello del martinetto piatto. L'elemento di muratura sottoposto a prova viene spostato orizzontalmente mediante il martinetto e lo sforzo che causa lo scorrimento dell'elemento in prova fornisce una misura della resistenza a taglio del giunto di malta.

Le fasi della prova prevedono:

- Asportazione della malta nei due giunti verticali a destra e a sinistra del mattone da sottoporre a prova;
- Inserimento del martinetto nel giunto libero dalla malta;
- Collegamento del martinetto alla centralina oleodinamica manuale;
- Installazione del sensore elettrico per la misura dello spostamento in funzione del carico applicato;
- Applicazione del carico verticale con l'utilizzo di due martinetti piatti inseriti nella muratura;
- Applicazione del carico orizzontale e rilievo degli spostamenti del mattone.



Particolare di una prova di taglio prima della fase di carico orizzontale







Particolare delle 3 prove di taglio

#### **RISULTATI DELLE INDAGINI EFFETTUATE**

#### 1.4. Ubicazione dei punti di prova

La prova M1 è stata effettuata sul lato interno della muratura in corrispondenza al livello E il più alto della struttura;

La prova M2 è stata effettuata sul lato esterno della muratura della cupola in corrispondenza del livello **D**;

La prova M3 è stata effettuata sul lato esterno della muratura in corrispondenza del livello sottotetto;

La prova M4 è stata effettuata sul lato esterno della muratura in corrispondenza del livello piano terra, muratura del transetto.

La prova T1 è stata effettuata in corrispondenza della prova con martinetti piatti M1;

La prova T2 è stata effettuata in corrispondenza della prova con martinetti piatti M3;

La prova T3 è stata effettuata in corrispondenza della prova con martinetti piatti M4.

#### **1.5.** Prove con martinetti piatti

#### 1.5.1. Prove con martinetto piatto per la determinazione dello stato di sollecitazione

Nella tabella che segue sono riportati i valori della sollecitazione verticale rilevata nella muratura in corrispondenza dei diversi punti di prova, unitamente ad alcuni elementi che consentono l'individuazione della posizione delle prove stesse.

-	· ·	
PROVA N.	UBICAZIONE	σ <sub>v</sub> [MPa]
M1	Muratura interna laterizio (LIVELLO E)	0,42
M2	Muratura esterna laterizio ( <b>estr. cupola-</b> LIVELLO <b>D</b> )	Legg. traz.
M3	Muratura interna laterizio (LIVELLO SOTTOTETTO)	0,92
M4	Muratura esterna laterizio (LIVELLO <b>PIANO TERRA</b> – MURATURA TRANSETTO)	0,79

Tab.1 risultati delle prove con martinetto piatto per la determinazione dello stato di sollecitazione

Nella figure successive sono riportati gli elaborati relativi ai dati delle singole prove con martinetti piatti.

Ogni scheda comprende la tabella dei valori degli spostamenti misurati nel corso delle prove in funzione della sollecitazione verticale e del tempo e il diagramma degli spostamenti rilevati in corrispondenza di ogni base di misura.



N.	Sollecitaz.	Base 1	Base 2	Base 3
	[Mpa]	[m x 10 <sup>-6]</sup>	[m x 10 <sup>-6]</sup>	[m x 10 <sup>-6]</sup>
1	P.T.	0,0	0,0	0,0
2	D.T.	152,0	184,0	208,0
3	0,00	0,0	0,0	0,0
4	0,09	24,0	40,0	40,0
5	0,17	52,8	76.8	76,8
6	0.26	88,0	120,0	115.2
7	0.34	120,0	150,4	161.6
8	0,43	152,0	184,0	206,4
9	0,34	123,2	152,0	164,8
10	0,17	57,6	83,2	83,2
11	0,00	4,8	8,0	4,8

Misura N. 1 prima del taglio - Misura N. 2 fine taglio Misure N. 3-11 ripristino del carico

sollecitazione misurata 0,43 Mpa







N.	Sollecitaz.	Base 1	Base 2	Base 3
	[Mpa]	[m x 10 <sup>-6]</sup>	[m x 10 <sup>-6</sup> ]	[m x 10 <sup>-6]</sup>
1	P.T.	0,0	0,0	0,0
2	D.T.	216.0	320.0	264.0
3	0,00	0,0	0,0	0,0
4	0.16	40.0	56.0	48.0
5	0.32	83.2	112.0	104.0
6	0.48	123.2	163.2	160.0
7	0.64	158.4	222.4	203.2
8	0.80	195.2	289.6	248.0
9	0,92	214,4	320,0	267,2
10	0,64	163,2	228,8	208,0
11	0,32	92,8	124,8	116,8
12	0,00	6,4	3,2	4,8
[	[			
[	[			
	1			
	1			

Misura N. 1 prima del taglio - Misura N. 2 fine taglio Misure N. 3-12 ripristino del carico









N.	Sollecitaz.	Base 1	Base 2	Base 3
	[Mpa]	[m x 10 <sup>-6]</sup>	[m x 10 <sup>-6</sup> ]	[m x 10 <sup>-6]</sup>
1	P.T.	0,0	0,0	0,0
2	D.T.	200,0	259,2	176,0
3	0,00	0,0	0,0	0,0
4	0,18	43,2	56,0	40,0
5	0,36	80,0	115,2	76,8
6	0,54	124,8	171,2	116,8
7	0,72	168,0	225,6	156,8
8	0,81	198,4	259,2	177,6
9	0,72	172,8	230,4	160,0
10	0,36	84,8	120,0	83,2
11	0,00	3,2	8,0	4,8

Misura N. 1 prima del taglio - Misura N. 2 fine taglio Misure N. 3-11 ripristino del carico sollecitazione misurata 0,81 Mpa





# 1.5.2. Prove con martinetto piatto per la determinazione delle caratteristiche di deformabilità

Per le prove eseguite con due martinetti piatti paralleli i campioni di muratura sono stati sottoposti a cicli di carico e scarico protratti fino a livelli massimi di sollecitazione gradualmente crescenti, rispettivamente pari a 0.8 – 1.6 - 2.4, MPa, mantenendo il valore del carico di fondo pari a 0.2 MPa. La prova M1B ha raggiunto il valore massimo pari a 2.0MPa, la prova M2B ha raggiunto il valore massimo pari a 2,4MPa, la prova M3B ha raggiunto il valore massimo pari a 2,2MPa, la prova M4B ha raggiunto il valore massimo pari a 2,8MPa,

Il modulo di deformabilità secante della muratura, riportato nella tabella successiva per ogni singola prova in funzione del livello di carico è stato calcolato nella prima fase di carico di ogni ciclo, in corrispondenza della base di misura centrale (base n.2).

PROVA N.	MOD	ULI DI DI					
	$\begin{tabular}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$					[2.0 – 2.4]	[2.4 – 2.8]
M1B	741	645	455	377			
M2B	1250	685	455	385		294	
M3B	3333	3333	2222	546	303		
M4B	3030	3333	3333	3333		2500	1818

Tab. 2 - risultati prove con due martinetti piatti per la determinazione delle caratteristiche di deformabilità

Nelle figure successive sono riportate le fotografie dei punti di prova e le schede relative ai dati delle singole prove con martinetti piatti doppi.

Ogni scheda, che comprende la documentazione riferita ad ogni punto di prova, include:

- tabella dei valori delle deformazioni misurate nel corso delle prove in funzione della sollecitazione verticale;
- diagrammi sollecitazione-deformazione di ogni base di misura;
- diagramma della curva sollecitazione- deformazione per la sola fase di carico e riferito alle basi n. 2 e 4;
- diagramma a barre del valore del coefficiente di Poisson e del modulo di deformabilità riferiti ai diversi livelli di sollecitazione.

#### PROVA CON MARTINETTI PIATTI DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITA' RIPRESA FOTOGRAFICA DELLA TESSITURA MURARIA DEL PARAMENTO PROVA M1B



# PROVA CON MARTINETTI PIATTI DETERMIMAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITA' MISURA DELLE DEFORMAZIONI

#### PROVA M1B

N.	Sollecitaz.	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4	N.	Pressione	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4
	[MPa]		(× 3	10 <sup>-5</sup> ]			[MPa]	MPa] $[\epsilon \times 10^{-5}]$			
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						
2	0,20	34,00	32,80	22,00	-0,80						
3	0,40	60,00	54,80	36,80	-2,00						
4	0,60	90,00	77,60	52,00	-4,40						
5	0,80	110,00	108,80	80,00	-8,00						
6	0,40	90,80	76,80	64,00	-2,40						
7	0,20	82,00	72,80	46,00	-1,20						
8	0,40	90,00	82,80	56,00	-2,00						
9	0,80	106,80	104,80	79,20	-8,00						
10	0,40	92,00	84,80	56,80	-2,80						
11	0,20	82,40	72,80	48,00	-1,20						
12	0,40	91,60	84,00	56,00	-2,40						
13	0,80	110,80	106,80	80,00	-10,00						
14	1,00	130,00	128,80	88,00	-10,00						
15	1,20	162,00	168,80	130,00	-20,00						
16	1,40	194,00	204,80	164,80	-28,00						
17	1,60	230,00	256,80	204,00	-40,00						
18	1,20	222,00	252,80	188,80	-35,60						
19	0,80	204,00	240,80	167,20	-28,00						
20	0,40	167,20	214,80	132,80	-22,00						
21	0,20	138,00	180,80	104,00	-12,00						
22	0,40	162,00	192,80	120,80	-16,00						
23	0,80	194,00	200,80	158,00	-24,00				400		
24	1,20	220,00	234,80	188,00	-34,00			<	>		
25	1,60	250,00	268,80	212,00	-44,00						
26	1,20	224,00	252,80	196,00	-36,00			200			
27	0,80	202,00	224,80	168,00	-26,00			╧╧			
28	0,40	174,00	200,80	136,00	-16,80			-	•		
29	0,20	146,00	188,80	112,00	-12,40						
30	0,40	172,00	198,80	124,00	-16,00						
31	0,80	201,20	220,80	166,00	-26,00		-				
32	1,20	225,20	250,80	200,00	-36,40		F		2 3		
33	1,60	250,00	270,80	220,00	-46,00		<b>_</b>				
34	1,80	286,00	308,80	260,00	-64,00						
35	2,00	334,00	376,80	308,00	-92,00		8 F	<u>(4_ </u>			
36	1,60	330,00	372,80	304,00	-84,00		4				
37	1,20	310,00	356,80	288,00	-64,00						
38	0,80	294,00	324,80	272,00	-56,00						
39	0,40	278,00	296,80	252,00	-40,00						
40	0,20	266,00	264,80	236,00	-28,00		-		400		
								←	>		





DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITA'

#### PROVA CON MARTINETTI PIATTI DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITA' RIPRESA FOTOGRAFICA DELLA TESSITURA MURARIA DELLA VOLTA PROVA M2B



# PROVA CON MARTINETTI PIATTI DETERMIMAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITA' MISURA DELLE DEFORMAZIONI

#### PROVA M2B

N.	Sollecitaz.	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4	N.	Pressione	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4
	[MPa]		(٤ ×	10 <sup>-5</sup> ]			[MPa]	$[\varepsilon \times 10^{-5}]$			
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42	0,40	348,00	328,00	404,00	-38,40
2	0,20	8,00	8,00	8,00	-4,00	43	0,20	336,00	308,00	384,00	-16,00
3	0,40	28,00	16,00	20,00	-8,00						
4	0,60	52,00	32,00	64,00	-12,00						
5	0,80	72,00	48,00	100,00	-17,60						
6	0,40	60,00	20,00	80,00	-20,00						
7	0,20	52,00	16,00	70,40	-6,40						
8	0,40	56,00	20,00	86,40	-9,60						
9	0,80	72,00	48,00	104,00	-16,00						
10	0,40	64,00	32,00	88,00	-6,40						
11	0,20	60,00	24,00	75,20	0,00						
12	0,40	65,60	31,20	96,00	-4,00						
13	0,80	73,60	45,60	112,00	-12,00						
14	1,00	100,00	72,00	148,00	-20,00						
15	1,20	128,00	104,00	188,00	-32,00						
16	1,40	172,00	144,00	232,00	-52,00						
17	1,60	204,00	192,00	280,00	-68,00						
18	1,20	176,00	176,00	272,00	-56,00						
19	0,80	144,00	156,00	244,00	-48,00						
20	0,40	104,00	128,00	208,00	-32,00						
21	0,20	76,00	96,00	176,00	-17,60						
22	0,40	105,60	120,00	196,00	-20,00						
23	0,80	145,60	153,60	244,00	-44,00						
24	1,20	168,00	176,00	273,60	-56,00			L	240		
25	1,60	208,00	193,60	296,00	-72,00						
26	1,20	176,00	176,00	284,00	-64,00			<b>7</b> 0			
27	0,80	160,00	152,00	256,00	-48,00			- <u>v</u> _l			
28	0,40	120,00	128,00	204,00	-24,00						
29	0,20	100,00	108,00	184,00	-17,60						
30	0,40	128,00	128,00	200,00	-23,20						
31	0,80	168,00	152,80	248,00	-44,80						
32	1,20	184,00	176,00	280,00	-60,80				1 2 3		
33	1,60	212,00	200,00	302,40	-72,00						
34	1,80	256,00	240,00	340,00	-80,00						
35	2,00	304,00	304,00	384,00	-97,60		000 E				
36	2,20	352,00	360,00	436,00	-116,00						
37	2,40	424,00	440,00	496,00	-144,00		↓ =				
38	2,00	420,00	438,40	488,00	-136,00						
39	1,60	408,00	424,00	468,00	-120,00						
40	1,20	392,00	400,00	456,00	-96,00				400		
41	0,80	372,00	368,00	432,00	-68,00			₭—	>		


#### DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITA'



PROVA M2B

## PROVA CON MARTINETTI PIATTI DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITA' RIPRESA FOTOGRAFICA DELLA TESSITURA MURARIA DELLA VOLTA PROVA M3B



## PROVA CON MARTINETTI PIATTI DETERMIMAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITA' MISURA DELLE DEFORMAZIONI

#### PROVA M3B

N.	Sollecitaz.	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4	N.	Pressione	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4
	[MPa]	$[\epsilon \times 10^{-5}]$				[MPa]	$[\varepsilon \times 10^{-5}]$				
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42	0,20	78,00	135,00	121,20	-12,00
2	0,20	12,00	12,00	13,20	0,00						
3	0,40	18,00	21,00	22,20	-1,20						
4	0,60	24,00	27,00	33,00	-3,00						
5	0,80	31,80	33,00	45,60	-3,60						
6	0,40	21,00	22,20	31,20	-2,40						
7	0,20	15,00	15,60	22,20	-0,60						
8	0,40	21,00	21,00	31,20	-1,20						
9	0,80	32,40	33,00	48,00	-2,40						
10	0,40	21,00	24,00	33,00	-1,80						
11	0,20	13,20	15,00	23,40	-1,20						
12	0,40	21,00	21,00	32,40	-1,80						
13	0,80	34,20	33,00	52,20	-2,40						
14	1,00	40,20	40,20	68,40	-3,00						
15	1,20	45,00	45,00	78,00	-3,60						
16	1,40	51,00	51,00	100,20	-4,20						
17	1,60	60,00	63,00	119,40	-6,00						
18	1,20	48,00	48,00	105,60	-4,80						
19	0,80	36,00	39,00	89,40	-4,20						
20	0,40	24,00	27,00	64,80	-3,00						
21	0,20	13,20	15,00	46,20	-1,80						
22	0,40	24,00	40,20	61,20	-6,00						
23	0,80	51,60	53,40	85,20	-7,20				400		
24	1,20	51,60	53,40	104,40	-7,20			<	>		
25	1,60	60,60	63,00	129,00	-9,60						
26	1,20	54,00	57,00	110,40	-7,80			200			
27	0,80	42,00	45,00	91,20	-6,60			╶╶╩──┓			
28	0,40	24,00	33,00	70,80	-5,40			-	-		
29	0,20	18,00	24,00	49,20	-4,20						
30	0,40	21,00	39,00	67,20	0,00						
31	0,80	37,80	48,00	88,20	-6,60		-				
32	1,20	48,00	51,00	109,20	-9,60		Ē				
33	1,60	60,00	61,80	128,40	-1,20						
34	1,80	72,00	87,00	148,20	-18,00						
35	2,00	96,00	135,00	172,20	-30,00						
36	2,20	132,00	201,00	211,20	-54,00						
37	2,00	132,00	198,00	207,00	-52,80		↓ ⊑				
38	1,60	126,00	190,80	193,20	-49,80		F				
39	1,20	117,00	180,00	175,20	-42,00						
40	0,80	105,00	165,00	154,20	-30,00				400		
41	0,40	90,00	150,00	133,20	-18,00			<─			





## DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITA'

#### PROVA CON MARTINETTI PIATTI DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITA' RIPRESA FOTOGRAFICA DELLA TESSITURA MURARIA DELLA VOLTA PROVA M4B



# PROVA CON MARTINETTI PIATTI DETERMIMAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITA' MISURA DELLE DEFORMAZIONI

#### PROVA M4B

N.	Sollecitaz.	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4	N.	Pressione	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4		
	[MPa]	[ε × 10 <sup>-5</sup> ]			-		[MPa] [ε × 10 <sup>-5</sup> ]			10 <sup>-5</sup> ]			
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42	1,60	94,00	94,00	68,80	-32,00		
2	0,20	10,80	10,80	6,40	-2,00	43	1,20	80,00	80,80	56,00	-26,00		
3	0,40	22,80	24,00	14,00	-1,20	44	0,80	68,00	70,00	44,80	-23,60		
4	0,60	31,60	30,00	22,00	-1,60	45	0,40	53,60	55,20	36,00	-14,00		
5	0,80	40,00	37,20	28,00	-2,40	46	0,20	46,00	44,00	27,20	-10,00		
6	0,40	28,00	26,00	16,80	0,00								
7	0,20	16,00	15,60	8,80	1,20								
8	0,40	26,00	24,00	16,00	-0,40								
9	0,80	40,00	40,00	28,00	-2,00								
10	0,40	28,00	29,20	18,00	0,40								
11	0,20	16,80	16,00	10,40	0,40								
12	0,40	26,00	25,20	16,40	-0,40								
13	0,80	40,00	40,00	28,80	-2,80								
14	1,00	48,00	46,40	34,00	-3,20								
15	1,20	54,00	52,00	39,60	-4,00								
16	1,40	60,00	58,00	41,60	-4,80								
17	1,60	66,00	64,00	49,20	-5,20								
18	1,20	58,00	55,20	41,20	-2,40								
19	0,80	44,80	43,20	30,00	-0,40								
20	0,40	29,60	28,00	18,00	1,60								
21	0,20	17,60	16,00	8,80	2,40								
22	0,40	28,00	27,20	16,00	2,00				345				
23	0,80	44,00	42,00	29,20	0,00			←					
24	1,20	58,00	54,00	40,00	-2,00				$\frown$				
25	1,60	67,20	63,60	48,00	-5,60								
26	1,20	59,20	55,20	40,80	-2,80								
27	0,80	45,20	43,60	30,00	-0,80			· · · ·					
28	0,40	30,00	28,00	18,00	0,80								
29	0,20	20,00	19,20	9,20	1,60								
30	0,40	28,00	26,00	16,00	1,20								
31	0,80	44,00	40,80	30,00	0,00								
32	1,20	56,00	56,00	41,20	-2,40				2 3				
33	1,60	68,00	66,00	49,60	-5,60								
34	1,80	74,00	72,00	54,00	-6,40								
35	2,00	80,00	78,00	60,00	-8,00		00						
36	2,20	90,00	86,00	65,60	-10,80								
37	2,40	98,00	94,00	71,20	-14,00								
38	2,60	104,80	104,00	76,00	-22,40								
39	2,80	112,00	116,00	86,00	-42,00								
40	2,40	110,00	112,80	86,00	-40,00				400				
41	2,00	104,00	104,00	78,00	-36,00			←					





#### DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITA'

## 1.5.3. Determinazione della resistenza al taglio dei giunti di malta orizzontali

Sono state eseguite n. 3 prove di scorrimento.

Il carico verticale applicato è stato pari a 0,4 MPa per le tre prove.

Il carico orizzontale applicato è stato pari a 0,75MPa per le prove T1 e T2, e di 0,85MPa per la prova T3.

Nonostante le sollecitazioni orizzontali fossero estremamente elevate non si è verificato lo scorrimento del mattone sul letto di malta. Solamente nella prova T1 si è verificato il movimento del mattone che ha provocato la rottura a trazione dei mattoni sopra e sotto quello sottoposto a sollecitazione orizzontale con uno scorrimento minimo pari a 0,6mm.

15 settembre 2018

Cassina de'Pecchi

prof.ing. Lorenzo Jurina