

CAMPAGNA DI INDAGINI NON DISTRUTTIVE SULLA CATTEDRALE DI AGRIGENTO

P.CAPIZZI¹, L. CAVALERI², M. COSTA³, M. GALLO⁴, E. LO GIUDICE⁵, G. NAVARRA⁶

¹*Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare, Università di Palermo*

²*DICAM, Università di Palermo*

³*Dirigente del Dipartimento Regionale della Protezione Civile per la Prov di Agrigento*

⁴*Laboratorio DISMAT s.r.l., Canicattì (AG)*

⁵*Direttore del Laboratorio DISMAT s.r.l., Canicattì (AG)*

⁶*Laboratorio DISMAT s.r.l., Canicattì (AG)*

INTRODUZIONE

I lavori di edificazione del Duomo di Agrigento cominciarono per volontà del Vescovo Gerlando di Besançon, cugino del conte Ruggero il Normanno, nel 1094 pochi anni dopo la conquista normanna della città avvenuta nel 1087. Ma già nel 1244 la costruzione fu distrutta a causa di un crollo dovuto ad una frana del costone occidentale ove essa sorgeva. Consacrata originariamente alla Madonna Assunta, titolo storico della Cattedrale agrigentina, venne dedicata a San Gerlando nel 1305, quando la chiesa fu ricostruita dal vescovo Bertoldo de Labro. La Torre Campanaria fu costruita dal Canonico Giovanni Montaperto nel 1470, essa è caratterizzata dal singolare utilizzo dei materiali nella costruzione delle pareti (Foto 2).

Nel corso dei secoli la cattedrale ha subito gravi danni sia a seguito del terremoto del 1693 e della frana del 1745, sia a causa dei rimaneggiamenti succedutesi in varie epoche come testimoniato dalla sovrapposizione di stili architettonici. Nel 1966 la famosa “frana di Agrigento” provocò ingenti danni e il Duomo rimase chiuso al culto per diversi anni. Recentemente gli eventi franosi verificatesi nel 2010 e i conseguenti dissesti evidenziatesi hanno costretto le autorità alla chiusura del Duomo al culto. A seguito di questi ultimi eventi il Dipartimento Regionale della Protezione Civile ha predisposto una doppia campagna di indagine riguardante gli aspetti Geotecnici e Strutturali. Nel lavoro si illustra, limitatamente agli aspetti strutturali, il piano di indagine predisposto ed attuato.



PIANO DI INDAGINE

Il piano di indagine predisposto dalla Protezione Civile, posto a fondamento dei documenti di gara di appalto, ha previsto:

- prove di caratterizzazione meccanica dei materiali e delle murature;
- prove di compressione semplice e diagonale su “muretti campione”,

- prove per la determinazione dello stato tensionale;
- prove chimiche e fisiche sulle malte;
- indagini conoscitive: endoscopie, georadar, termografie, pozzetti di ispezione, scoperture;
- prove di caratterizzazione dinamica.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

Le prove di caratterizzazione meccanica hanno previsto in dettaglio:

- ✓ prove mediante martinetti piatti doppi,
- ✓ prove su cilindri ricavate da carote,
- ✓ prove di compressione semplice e diagonale su “muretti campione” appositamente preparati utilizzando materiali compatibili con quelli in situ.

Sono state previste dieci prove su concio murario con martinetto doppio (fig. 1), grazie alle quali è stato possibile valutare le caratteristiche meccaniche locali della muratura (resistenza e modulo elastico). In tutte le prove sono stati utilizzati martinetti piatti semiovali.

Dal punto di vista metrologico, in mancanza di norme a riguardo, si è effettuata una verifica della catena di misura costituita da martinetto, circuito, pompa e trasduttori di pressione.



Prove con martinetto piatto doppio – foto 3, 4, 5

Inoltre è stato svolto uno studio preliminare riguardante la scelta del martinetto piatto da utilizzare; allo scopo sono state confrontate le prestazioni in termini di K_m di alcuni martinetti disponibili in commercio e si sono svolte le verifiche dimensionali (misure di spessore e di peso) significative ai fini della prestazione (foto 6). A valle delle operazioni di verifica metrologica e della valutazione prestazionale effettuata presso la stazione di taratura del Laboratorio DISMAT (foto 3) si è scelto di impiegare i martinetti prodotti dalla Boviar.

Ad integrazione delle prove con martinetto piatto doppio, sono state eseguite numerose prove meccaniche e fisiche su provini cilindrici, ricavati da carote, che hanno consentito di valutarne la resistenza a compressione, la massa volumica e la porosità (UNI EN 1926).

L'esame delle risultanze sperimentali ha permesso da un lato di identificare con accuratezza le caratteristiche meccaniche e fisiche dei litotipi (calcarenite) e dall'altro di stabilire un confronto con le risultanze derivanti dalle prove con martinetto piatto doppio. Infine la sperimentazione sui litotipi ha costituito una guida indispensabile per la scelta dei blocchi di calcarenite con cui sono stati confezionati i muretti campione.



Foto 6



Carotaggio – foto 7, 8

Per caratterizzare ulteriormente il comportamento meccanico della muratura sono stati costruiti sei “muretti campione” da sottoporre a prove di compressione semplice e diagonale. Nella costruzione si è avuta cura di impiegare materiali compatibili con quelli utilizzati nelle fabbriche del Duomo.



Prova di compressione su muretto – foto 9, 10, 11

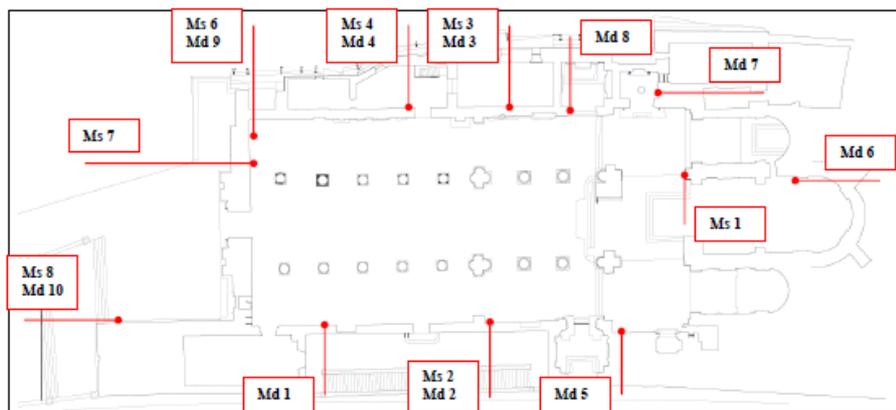
Lo schema di muratura realizzato è di tipo ordinario costituito da cinque file e a tre teste. Nel confezionamento sono state utilizzate due geometrie di blocchi, le dimensioni della prima tipologia sono 25 x 25 x 50 cm, mentre della seconda 35 x 25x 25 cm. Lo spessore del giunto di malta è di circa 1 cm. Le dimensioni totali del pannello murario sono 113 x 131 x 50 cm. La malta, è costituita da sabbia e calce idrata ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) nel rapporto in peso legante/aggregato 0.1463



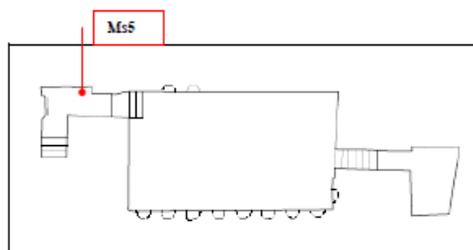
Prova di compressione diagonale – foto 12, 13

PROVE PER LA DETERMINAZIONE DELLO STATO TENSIONALE

Lo stato di tensione presente in alcune sezione delle fabbriche del Duomo è stato stimato mediante la tecnica del martinetto piatto singolo; allo scopo si sono effettuate 8 prove ubicate in porzioni di muratura ritenute significative (fig. 1). I valori di tensione rilevati sono stati riportati in un diagramma per mettere in evidenza le differenze di sollecitazione presenti nelle murature.



Planimetria 1: Planimetria Interno Duomo



Planimetria 2: Planimetria Locale Sotto Museo Diocesano

Fig. 1



Foto 14

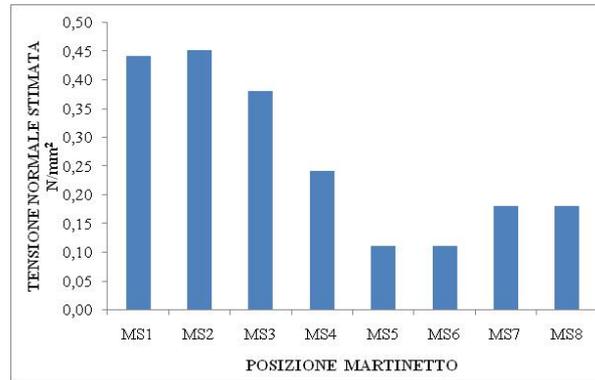


fig. 2

INDAGINI ENDOSCOPICHE – POZZETTI DI ISPEZIONE

Le numerosissime indagini di tipo endoscopico, eseguite all'interno di fori ottenuti mediante carotaggio, hanno consentito di identificare la muratura nello spessore (differenza di litotipi – foto 16) e sono risultate particolarmente utili per la individuazioni di cavità e di zone iniettate con malta (oggetto di passati interventi di consolidamento).



Carotaggio, Endoscopia in foro – foto 15, 16, 17

I pozzetti hanno consentito di ispezionare le fondazioni, di rilevare la presenza fessurazioni nascoste e gli interventi attuati negli anni passati.

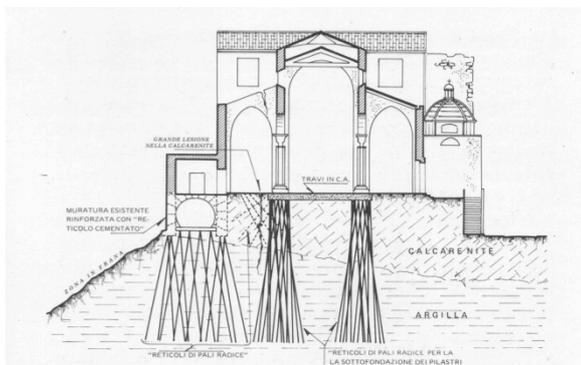


Fig. 3: Sezione trasversale dell'edificio con interventi della Fondedile [1]



Foto 18: Fessura nascosta dalla pavimentazione



Foto 19, 20

In particolare si sono individuate le travi in c.a. facenti parte del reticolo di fondazione realizzato dalla Fondedile a collegamento degli interventi di sottofondazione delle colonne della navata centrale (figg. 3-4, e foto 21) [1].

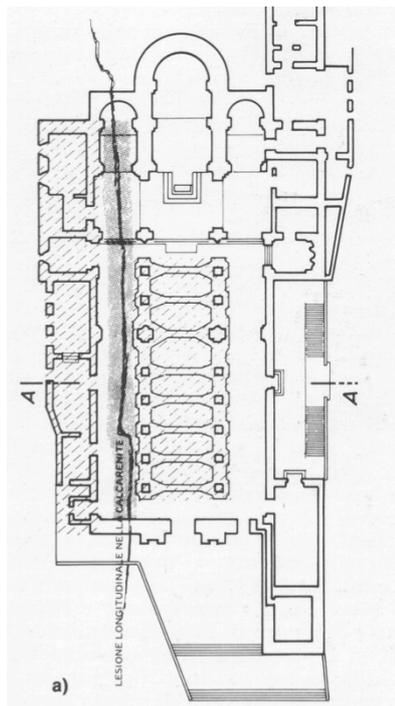


Fig. 4: pianta dell'edificio [1]



Foto 21: Opere di consolidamento delle fondazioni mediante reticolo di travi in c.a. e micropali

PROVE CHIMICO-FISICHE

La caratterizzazione mineralogica dei materiali costituenti i campioni di malta prelevati, allo scopo di riconoscere le principali fasi cristalline presenti, è stata indagata tramite diffrazione a raggi X (XRD). I campioni sono stati preliminarmente macinati manualmente in mortaio di agata e passati poi al vaglio ASTM n° 230 con luce di 63 µ e successivamente sottoposti all'analisi XRD in fig. 3-4 sono riportati i risultati dell'analisi spettrale ed in Tab 1 le principali fasi cristalline.

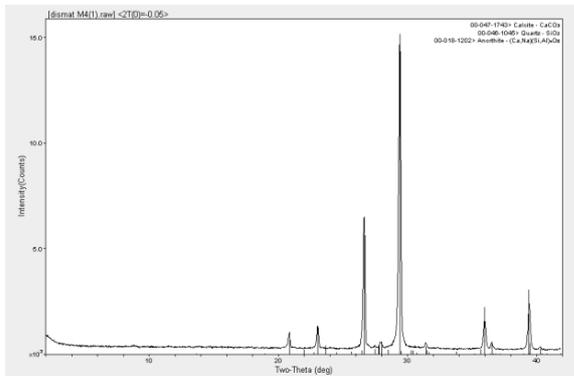


Fig. 3

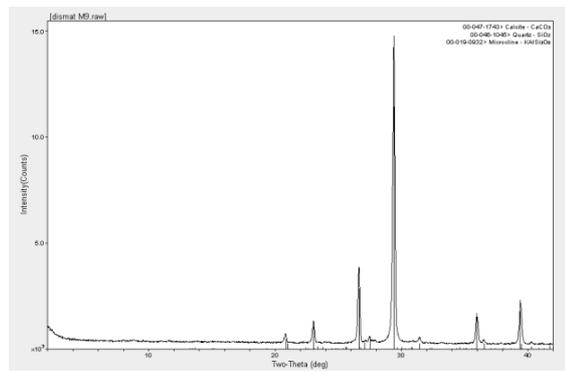


fig. 4

Tab:1

Campione	Punto di prelievo	Principali fasi cristalline
E	Malta di allettamento M4	Calcite CaCO ₃
		Quarzo SiO ₂
L	Malta di allettamento M9	Calcite CaCO ₃
		Quarzo SiO ₂

La determinazione del contenuto di aggregato siliceo è stata eseguita secondo la UNI EN 11088. Il campione di analisi della malta viene sottoposto ad un attacco chimico con una soluzione molto diluita di acido cloridrico (foto 20). Tale attacco porta in soluzione la matrice legante e l'eventuale aggregato calcareo, lasciando indisciolti l'aggregato di natura silicea comprensivo dell'eventuale materiale di natura pozzolanica che non ha reagito con la calce (foto 21). Il Residuo dell'attacco è costituito dall'aggregato siliceo e/o silicatico presente nella malta in esame, le tab. 3-4 restituiscono i risultati delle analisi svolte.



Foto 21



foto 22

Tab. 3

Campione	Punto di prelievo	Quantità di aggregato siliceo
A	Martinetto doppio 1	19,25 %
B	Martinetto doppio 2	20,86%
C	Martinetto doppio 3	19,60%
D	Martinetto doppio 4	19,60%
E	Martinetto doppio 5	19,90%
F	Martinetto doppio 6	21,10%
G	Martinetto doppio 7	19,20%
H	Martinetto doppio 8	21,20%
I	Martinetto doppio 9	19,60%
L	Martinetto doppio 10	18,90%

Tab. 4

Campione	Punto di prelievo malta	Contenuto della silice solubile
A-A1	Martinetto doppio 1	1.74 %
B-A1	Martinetto doppio 2	1.14 %
A-C1	Martinetto doppio 1	0.53 %
C-C1	Martinetto doppio 3	0.71 %
A	Martinetto doppio 1	1.08 %
B	Martinetto doppio 2	0.88 %

INDAGINE TERMOGRAFICA

La termografia in infrarosso permette di determinare la temperatura di una superficie attraverso la misura della radiazione “di corpo nero”, emessa da ogni oggetto in funzione della propria temperatura. Ogni materiale emette con continuità energia, sotto forma di radiazioni elettromagnetiche, in maniera proporzionale alla sua temperatura superficiale che a sua volta è funzione della conducibilità termica e del calore specifico. Differenze tra i valori di questi parametri, relativi a diversi comportamenti di una muratura, (pietre, mattoni, malta) portano i componenti stessi ad assumere temperature differenti e pertanto discernibili dalla termoripresa. In questo modo i materiali caratterizzati da una elevata conducibilità termica, nonché da un calore specifico molto basso, tenderanno rapidamente a raggiungere temperature maggiori di altri materiali, allo stesso modo una volta terminato il ciclo di riscaldamento questi stessi tenderanno a raffreddarsi più rapidamente rendendone possibile la distinzione. I limiti pratici di questa tipologia di applicazione sono da ricercare negli spessori elevati degli intonaci (maggiori di 3 cm), la cui inerzia termica contribuisce spesso ad attenuare il segnale di risposta del materiale retrostante riducendo di fatto la possibilità di un distinguo. L'apparecchiatura impiegata nell'analisi è stata una termocamera Flir, modello ThermaCam™ B2, avente: risoluzione spaziale 2,0 mrad e risoluzione Termica < 0,1°C.



fig. 5



fig. 6

L'irraggiamento è stato di tipo naturale. L'indagine ha consentito di cogliere alcune informazioni sulla presenza di fessure, cambi di spessore delle pareti, aperture occultate e la presenza di interventi di consolidamento mediante intonaci armati con reti metalliche elettrosaldate.

INDAGINE GEORADAR

Lo scopo delle indagini GPR è stato quello di fornire un supporto diagnostico agli interventi di restauro e di consolidamento delle pareti interne e delle colonne che delimitano la navata centrale della chiesa. In particolare, sono state indagate n°2 porzioni di pareti e n°3 colonne.

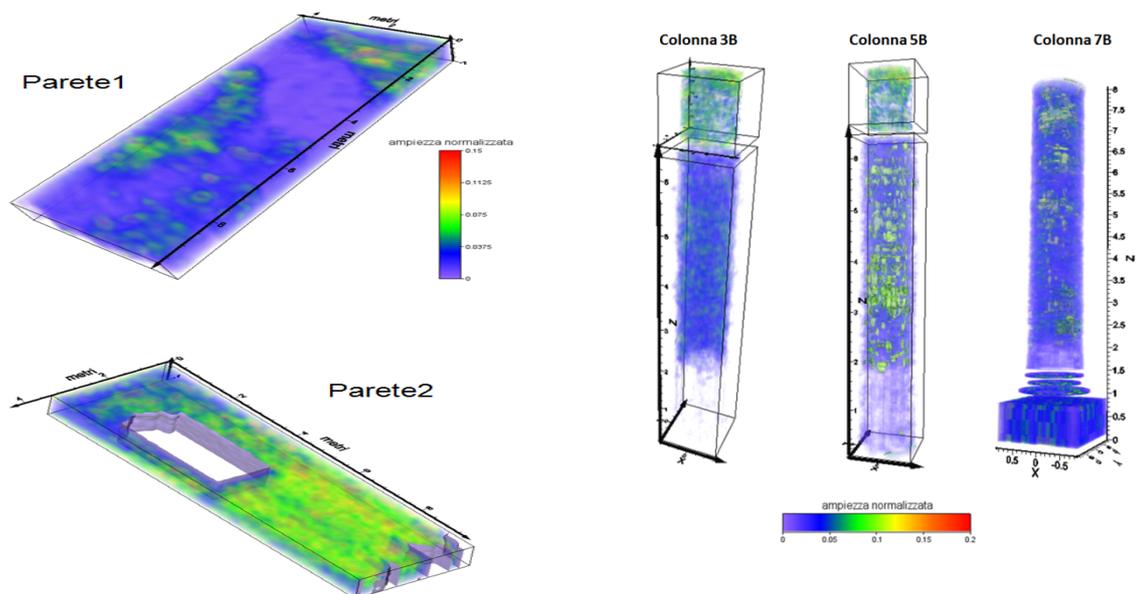


Fig. 7 – Mappe 3D interpolate dai dati GPR acquisiti nella parete 1 e nella parete 2.

Fig. 8 – Mappe 3D interpolate dai dati GPR acquisiti nelle colonne 3B, 5B e 7B.

Le indagini georadar sono state effettuate utilizzando il sistema georadar RIS- MF-HI-Mod della IDS (Ingegneria Dei Sistemi), capace di generare, captare, amplificare, filtrare ed archiviare i segnali e permette di visualizzare in tempo reale i dati acquisiti attraverso uno computer portatile. L'uso di un'antenna caratterizzata da una frequenza centrale 2 GHz (alta frequenza) ha permesso di ottenere un alto livello di dettaglio dei dati acquisiti.

Per trasformare i tempi di andata e ritorno delle onde riflesse in "profondità dei riflettori", è stato stimato, con misure in trasparenza, il valore della velocità delle onde elettromagnetiche nel mezzo, e quindi il valore della sua costante dielettrica media ϵ_r . La costante dielettrica stimata è di circa 12 corrispondente ad una velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche di 0.08 m/ns. Questo valore è stato imposto a tutti i profili eseguiti.

Per le indagini eseguite si è scelta una restituzione grafica tramite timeslice, che rappresentano delle vere e proprie mappe calcolate a diversa profondità, e tramite volume rendering. La scala delle ampiezze di tutti i profili presentati in questa relazione è stata normalizzata per il valore massimo registrato. Sono state costruite le mappe 2D ottenute integrando i risultati presenti lungo i profili alle diverse profondità. La figura 7 mostra il volume rendering delle porzioni di parete indagate, che ha permesso di individuare e definire la forma di alcune anomalie. In particolare nella parete 1 sono state riscontrate due anomalie geometricamente definite, la prima nella porzione in alto a destra della parete, di forma triangolare, e la seconda nella parte centrale a sinistra dell'area indagata, con una forma simile a quella di una corona circolare. Nella parete 2 è stata invece evidenziata la presenza di una rete elettrosaldata nell'area posta sotto la finestra, che non ha permesso di determinare la presenza di eventuali anomalie nella muratura sottostante.

Nella figura 8 sono presentate le mappe 3D ottenute integrando i risultati acquisiti nelle tre colonne. Le mappe permettono l'individuazione delle principali anomalie riscontrate imputabili ad eterogeneità del materiale. In particolare i modelli 3D ottenuti mostrano chiaramente che la parte inferiore del fusto delle colonne, fino a circa 2 metri di altezza, è costituito da un diverso tipo di materiale rispetto alla parte superiore.

CARATTERIZZAZIONE DINAMICA

Questa indagine, attualmente in fase di esecuzione, ha previsto la registrazione della risposta della struttura sottoposta a forzante di tipo ambientale. Sono stati collocati allo scopo sei basi accelerometriche biassiali, collegate ad una centralina di acquisizione gestita da un apposito software prodotto dalla Wintek. Di seguito si riporta uno schema della collocazione degli accelerometri.

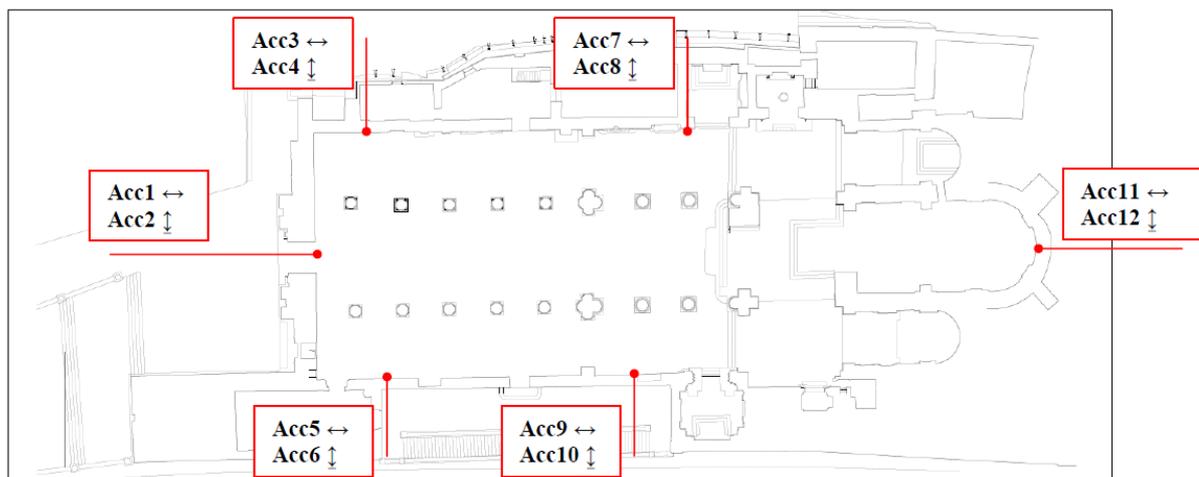


Fig. 9

Le acquisizioni ad oggi in fase di studio saranno elaborate sia nel dominio del tempo che della frequenza e costituiranno un supporto fondamentale per la predisposizione di modelli FEM globali e parziali.

CONCLUSIONI

Il piano di indagine che ha previsto il largo impiego di tecniche non distruttive o limitatamente distruttive ha permesso di costruire un quadro accurato delle caratteristiche morfologiche, meccaniche e fisiche degli elementi costituenti le strutture portanti. Ha permesso anche la diagnosi dei dissesti presenti ed ha contribuito mediante la dinamica sperimentale di cogliere il comportamento globale dell'intera fabbrica.