

**M. Lualdi <sup>(1)</sup>, M. Gianinetto <sup>(2)</sup>, L. Zanzi <sup>(1)</sup> e A. Saisi <sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano

<sup>(2)</sup> Dipartimento IIAR sez. Rilevamento, Politecnico di Milano

## **COMPLEMENTARIETÀ DELLE INDAGINI TERMOGRAFICHE E GEORADAR NELLA DIAGNOSTICA DEGLI EDIFICI**

**Riassunto.** Le indagini non distruttive sugli edifici stanno avendo un lento ma progressivo sviluppo nell'ingegneria civile. Le tecniche di geofisica applicata trovano in questo settore numerose applicazioni e stimoli per nuove ricerche. I restauratori e gli ingegneri civili, dall'applicazione di queste tecnologie richiedono informazioni sulla geometria degli elementi non visibili, sul loro stato di ammaloramento e sulla matrice che compone i materiali dell'edificio. Una tale quantità di informazioni eterogenee richiede l'utilizzo di più sistemi basati su principi fisici di funzionamento diversi. In questo lavoro ci si è occupati dell'analisi delle potenzialità di individuazione e ricostruzione delle geometrie degli elementi non visibili di un edificio. Le tecnologie considerate sono state la Termografia (attiva e passiva) e il Georadar, metodologie differenti nei principi fisici di funzionamento, nelle possibilità operative e investigative. È presentato il caso di studio di una campagna di misure sperimentali Georadar e Termografica su di un edificio storico per verificare la complementarità delle due metodologie.

### **GPR AND THERMOGRAPHY INVESTIGATIONS IN THE DIAGNOSTICS OF THE BUILDINGS. COMPLEMENTARITY OF THE DIFFERENT TECHNIQUES**

**Abstract.** The application of Non Destructive investigations on the buildings is slowly gaining importance and diffusion. The techniques of applied geophysics find in this field several applications that stimulate new research activities. The renovators and the civil engineers require from the use of these techniques information on the geometry of the hidden elements, on their state of damage and on the properties of the construction materials. Such a quantity and heterogeneity of information require the use of different investigation techniques. This paper presents an analysis of the potential offered by the combination of two different methods, thermography and GPR, in detecting the hidden elements of a building and in describing their geometry. The issue is discussed by presenting a recent case study where the complementarity of the two methodologies was tested.

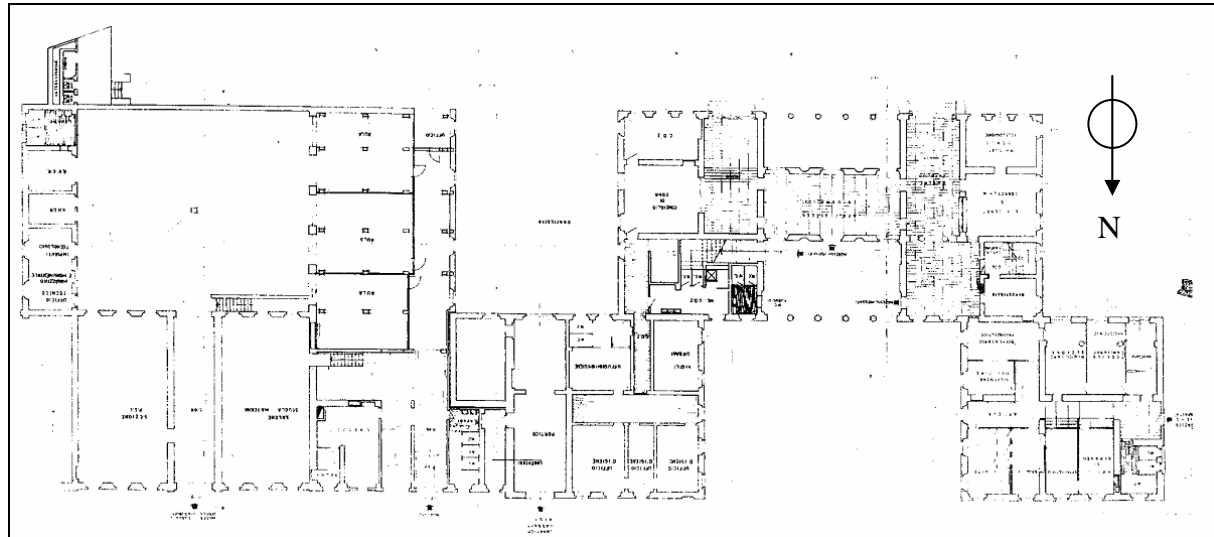
## **INTRODUZIONE**

Villa Litta Modignani è un interessante esempio di palazzo nobiliare nell'area di Milano (Fig. 1). La costruzione del palazzo iniziò nel 1687, sulle rovine di un palazzo nobiliare preesistente del XIV secolo, e si protrasse fino all'inizio del XVIII secolo. Il palazzo è disposto su tre livelli ed è formato da un corpo centrale con un doppio porticato all'ingresso e da due corpi laterali più bassi, dei quali solamente l'ala ovest risulta connessa al corpo centrale (Fig. 2) (Boriani et al., 1986; Langè, 1972).

Spesso accade che per gli edifici storici non siano più reperibili i progetti e i disegni originali, come neppure lo siano i dettagli degli interventi di rifacimento succeduti nel corso dei secoli. La conoscenza della morfologia (tipo di muratura e sua tessitura, presenza di catene di rinforzo, presenza di vuoti), così come quella delle tecniche costruttive impiegate, è però di fondamentale importanza per pianificare correttamente gli interventi di restauro conservativi (Colla et al., 1997; Saisi et al., 2001; Binda et al., 1998).



**Fig. 1** - Villa Litta Modignani (Milano).



**Fig. 2** - Planimetria di villa Litta Modignani (XVII secolo).

Poiché il Comune di Milano, proprietario di villa Litta Modignani, aveva in progetto un importante intervento di restauro per il riuso della villa e, non disponendo di sufficiente documentazione sulla sua costruzione, si è deciso di eseguire una campagna di misure congiunte di termografia e georadar, con lo scopo di verificare la complementarietà delle due tecniche in questo tipo di indagini.

## **ACQUISIZIONI E INTERPRETAZIONI**

Uno dei problemi affrontati a villa Litta Modignani è stato lo studio delle volte. In particolare, si sono studiate:

- la morfologia del porticato del corpo centrale;
- la morfologia della volta della biblioteca situata all'ultimo piano dell'ala ovest;
- la morfologia della volta dell'ex refettorio situato al piano terra.

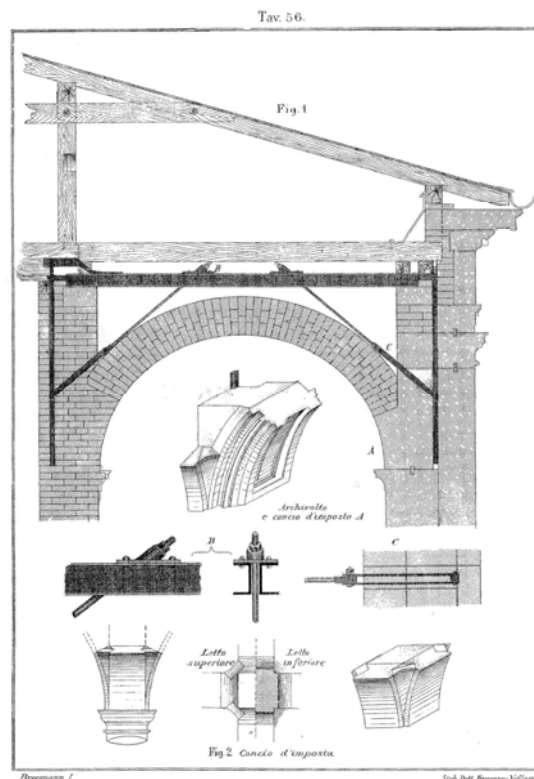
In aggiunta a questi problemi relativi alle volte, sono stati risolti altri quesiti morfologici come lo studio del sistema di travi di una pavimentazione in legno e la verifica del materiale usato per la costruzione di alcune colonne.

### Analisi del porticato

Per quanto riguarda il porticato (Fig. 3), le indagini avevano lo scopo di evidenziare l'eventuale presenza di catene nascoste nelle volte. Durante il XVII e il XVIII secolo, infatti, per motivi estetici, le catene erano spesso posizionate all'estradosso della volta, nascoste nella muratura, in modo da non essere visibili dall'esterno (Fig. 4). Sebbene le indagini non distruttive non siano in grado di determinarne lo stato di conservazione e di stress, poter identificare la presenza e definire la posizione delle catene è di estrema utilità per la pianificazione degli interventi di recupero. Inoltre, nota la geometria delle catene, è possibile effettuare piccole prospezioni distruttive mirate, qualora fosse necessario.



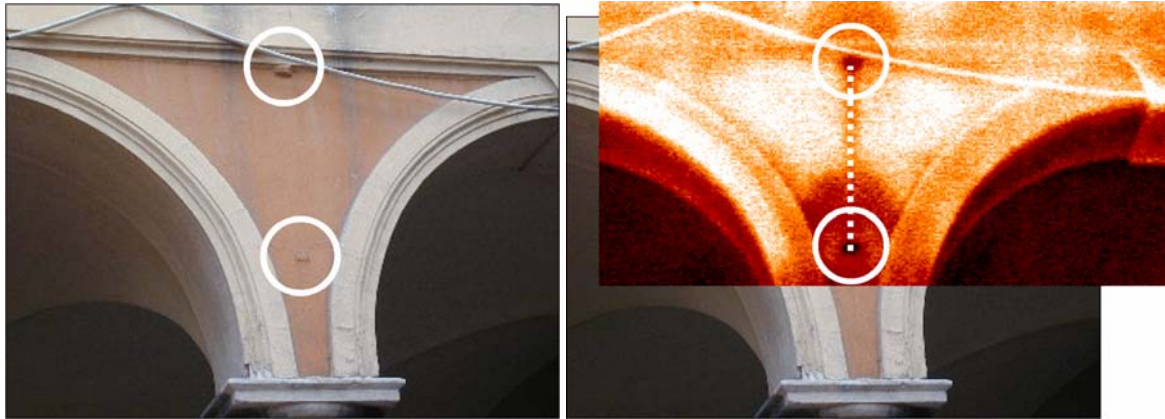
**Fig. 3** - Porticato del corpo centrale di Villa Litta Modignani.



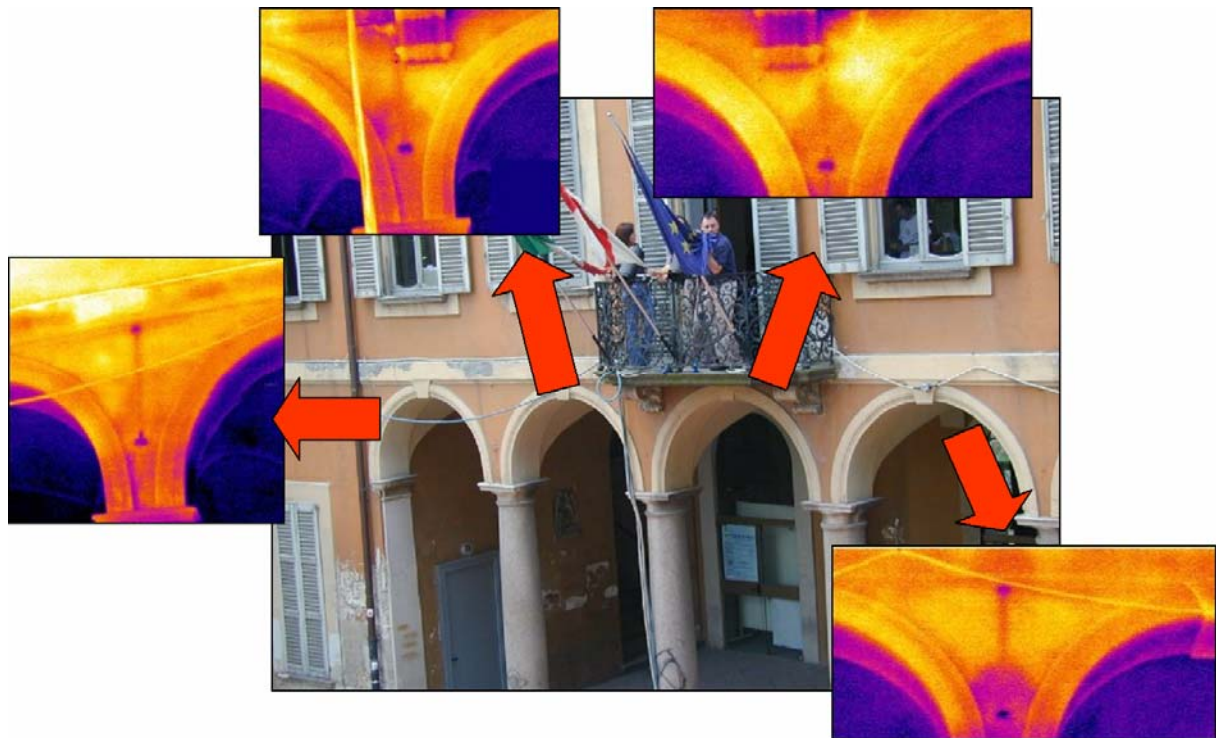
**Fig. 4** - Esempio di rinforzo nascosto nella muratura (Breyman, 1881).

Un'analisi visiva del porticato evidenziava sulla facciata la presenza dei capochiave superiore e inferiore per le volte più esterne e la presenza dei soli capochiave inferiori per le due volte centrali. Non si era però in grado di stabilire se le tirantature fossero ancora al loro posto, oppure se fossero state rimosse negli interventi di restauro eseguiti negli anni '50.

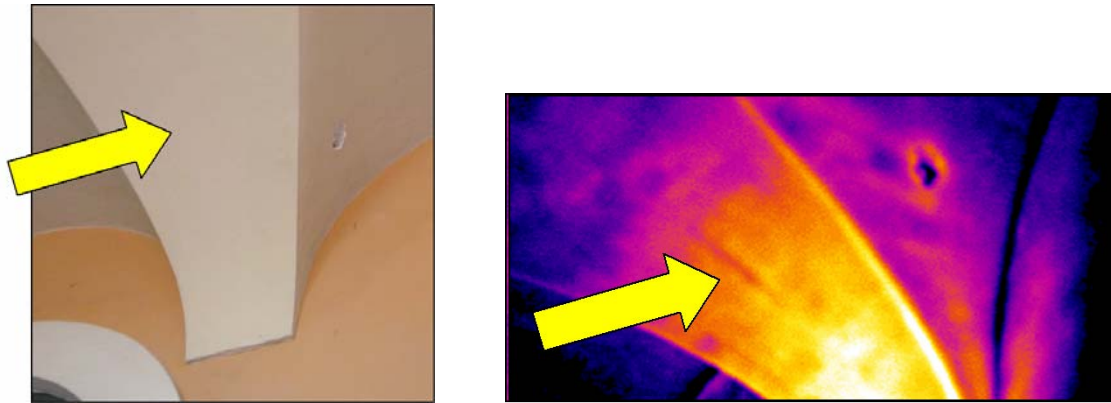
Con la termografia è stata individuata la presenza dei tiranti metallici verticali, presenti in tutte le volte (Figg. 5 e 6). Inoltre, mediante l'ausilio di un bruciatore a gas, è stato studiato il transitorio termico delle volte del porticato. Anche in questo caso la termografia ha evidenziato la presenza di catene subsuperficiali nascoste nelle volte (Fig. 7), con geometria analoga a quella descritta in Fig. 4.



**Fig. 5** - Capochiave (evidenziati) visibili sulla muratura esterna (a sinistra). Tirante metallico verticale (linea tratteggiata) nascosto nella muratura ed evidenziato nella termografia (a destra).



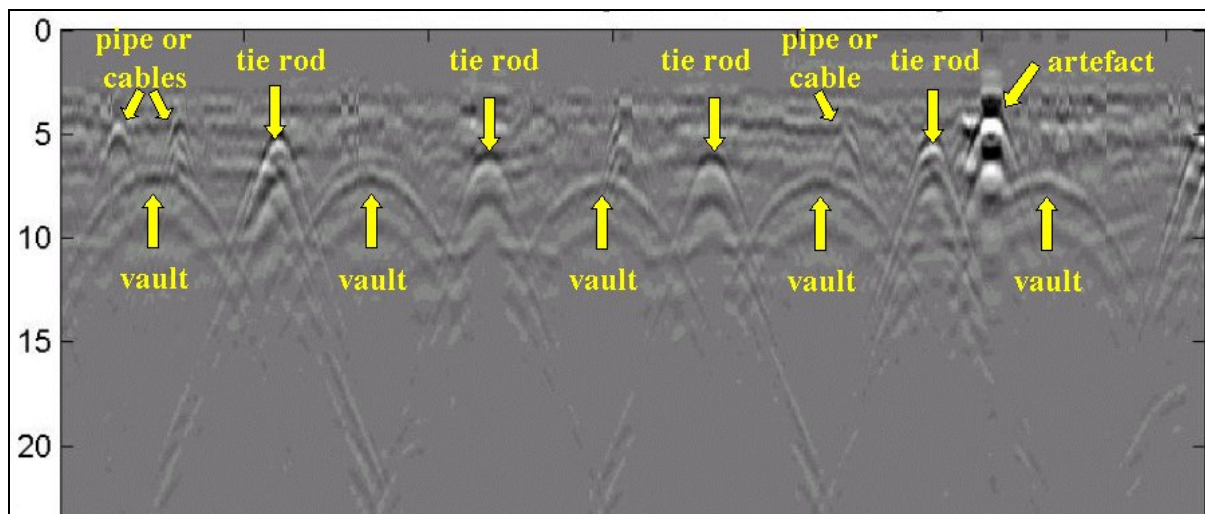
**Fig. 6** - Tiranti metallici verticali nascosti nella muratura ed evidenziati nelle termografie (linee verticali più scure).



**Fig. 7** - Identificazione degli elementi obliqui dei tirantaggi mediante termografia attiva.

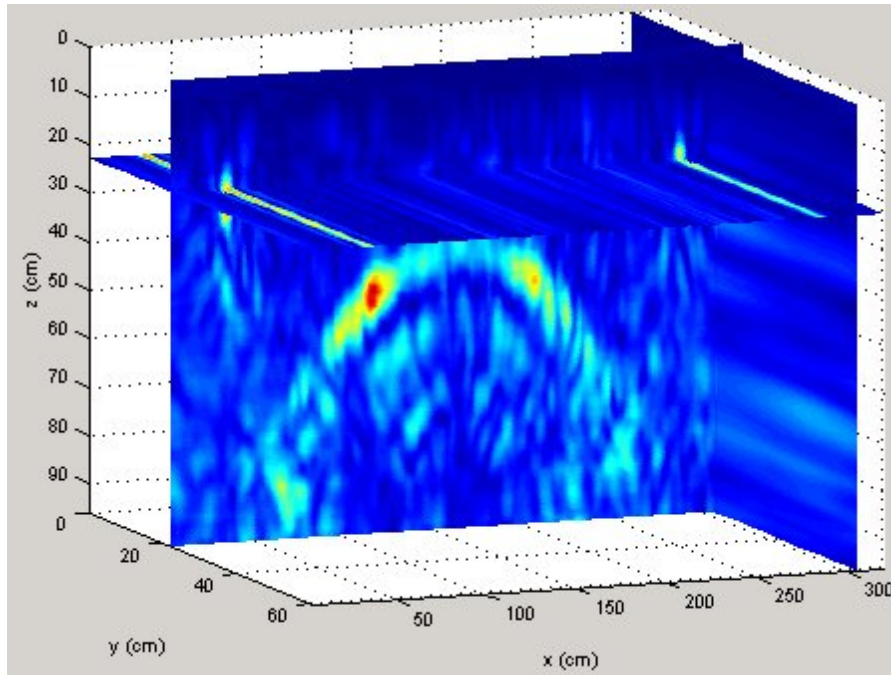
Lo stesso porticato è stato indagato con il georadar. L'acquisizione è stata eseguita dal corridoio soprastante il porticato utilizzando un'antenna da 1 GHz. In Fig. 8 è riportato un profilo radar in direzione est-ovest dell'intero porticato. Nel profilo sono chiaramente distinguibili le iperboli di diffrazione delle cinque volte (vault) ed è confermata la presenza delle tirantature orizzontali (tie rod). È inoltre evidenziata la presenza di impianti (cablaggio e/o tubazioni) in tre punti (pipe or cable).

Confermata la presenza delle catene nella muratura, si è proceduto con l'acquisizione di un set di profili paralleli e densi per restituire i dati tridimensionalmente. Dal radargramma 3D è stata determinata con precisione la forma delle volte e la posizione delle catene (Fig. 9).

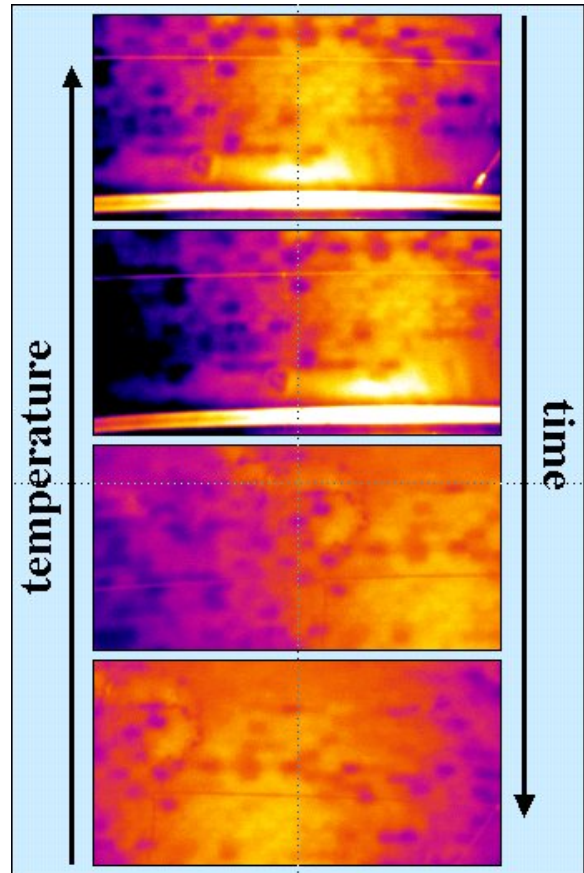
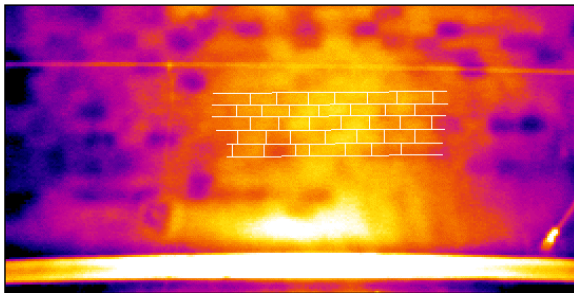


**Fig. 8** - Profilo radar del porticato acquisito con antenna da 1 GHz. In evidenza le volte (vault), le catene (tie rods) e alcuni servizi (cavi e tubazioni).

L'interpretazione congiunta delle misure GPR e di termografia hanno consentito di affermare con sicurezza che la tipologia costruttiva delle volte del porticato di villa Litta Modignani è analoga a quella precedentemente descritta in Fig. 4 (Breymann, 1881).



**Fig. 9** - Profilo radar 3D di una volta del porticato acquisito con antenna da 1 GHz. In evidenza la presenza dei tiranti (sulla destra e sulla sinistra della volta) nella sezione orizzontale alla profondità di 22 cm.

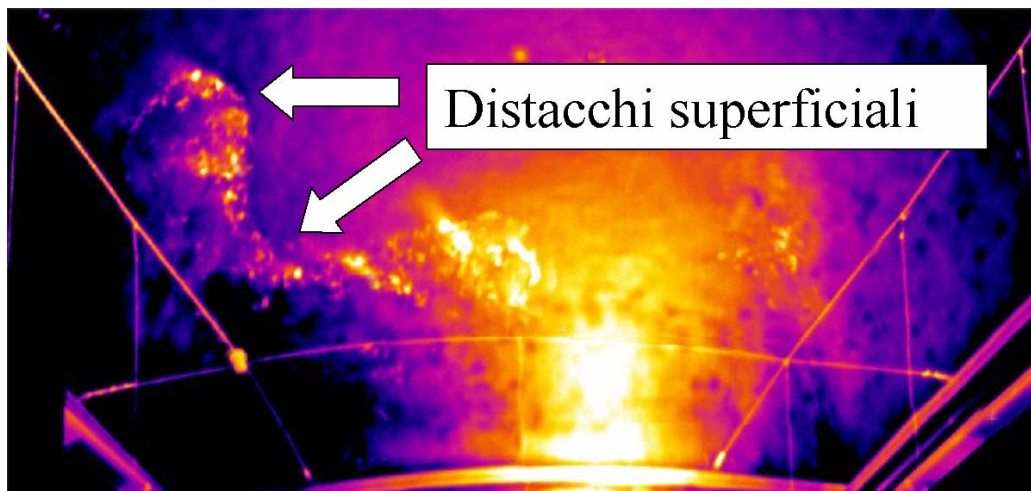


**Fig. 10** - Transitorio termico di raffreddamento della volta della biblioteca (sulla destra). La termografia evidenzia la tessitura muraria della volta (sulla sinistra).

### **Analisi della volta della biblioteca**

Negli edifici storici non è infrequente trovare volte realizzate con una struttura in legno a solo scopo decorativo. L'intradosso è ricoperto da un sottile strato di paglia e il tutto è ricoperto con stucchi o affreschi.

La biblioteca presente nel primo piano dell'ala ovest del palazzo presenta una volta che, per caratteristiche, poteva avere scopo decorativo e non funzione strutturale. Anche in questo caso la volta è stata indagata mediante l'ausilio della termografia, riscaldando artificialmente la muratura e analizzando il transitorio di raffreddamento. La Fig. 10 mostra che sotto l'intonaco è presente una vera volta in laterizio. Inoltre, la termografia ha evidenziato la presenza di materiali disomogenei nella volta ed estese zone di distacco degli intonaci (Fig. 11).



**Fig. 11** - Distacchi superficiali dell'intonaco dalla volta della biblioteca.

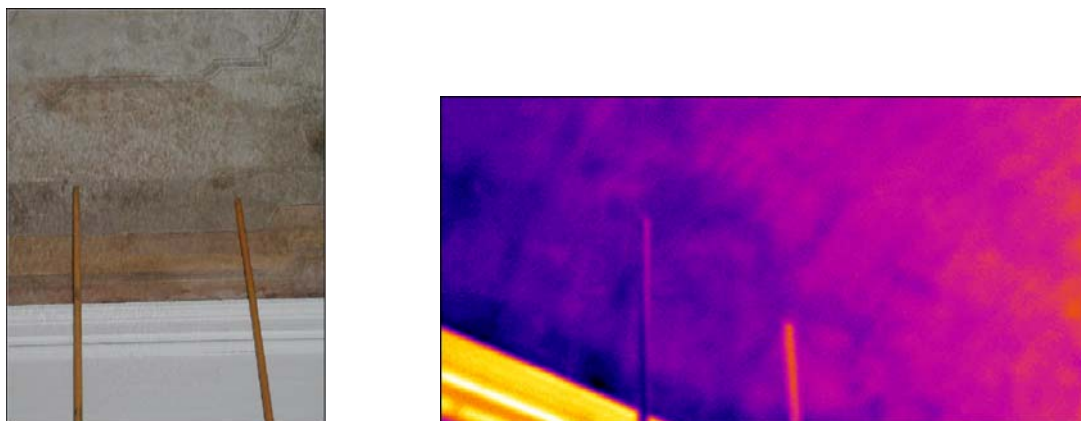
### **Analisi della volta dell'ex refettorio**

Similmente a quanto già descritto nel caso della biblioteca, anche la volta dell'ex refettorio è stata indagata mediante rilievo termografico in transitorio termico. Anche in questo caso la volta è risultata realizzata in laterizio con il piano d'imposta dei mattoni parallelo al lato maggiore della sala (Fig. 12). È interessante notare come la volta dell'ex refettorio presenti una tipologia costruttiva differente rispetto a quella della biblioteca del piano superiore.

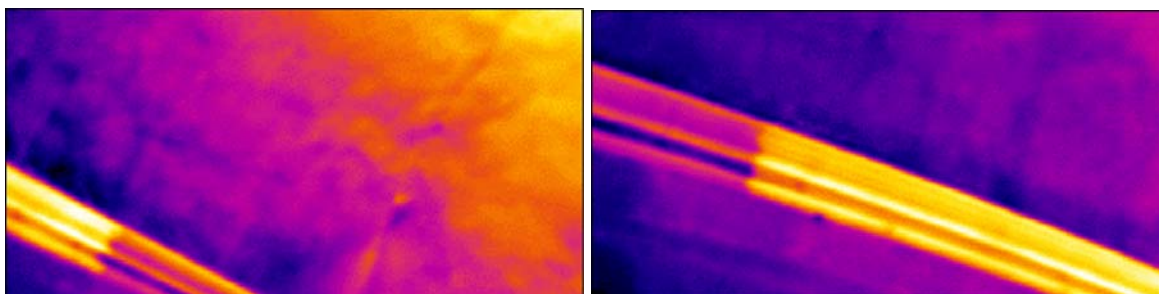
Oltre alla struttura interna della volta affrescata, la termografia ha permesso di individuare una traccia termica dalla forma geometrica regolare in corrispondenza della parete est (Fig. 13). Questa potrebbe testimoniare l'esistenza di un tamponamento o di un fregio una volta presente e oggi non più esistente. Inoltre, è stata osservata una netta discontinuità delle caratteristiche termiche della cornice superiore (Fig. 14) che fa presupporre l'uso di due materiali diversi.



**Fig. 12** - Ex refettorio. Termografia all'infrarosso termico che mette in evidenza la tessitura muraria e il piano d'imposta dei mattoni.



**Fig. 13** - Ex refettorio. La termografia ha evidenziato la presenza di una struttura circolare (a destra) non visibile in fotografia (a sinistra).

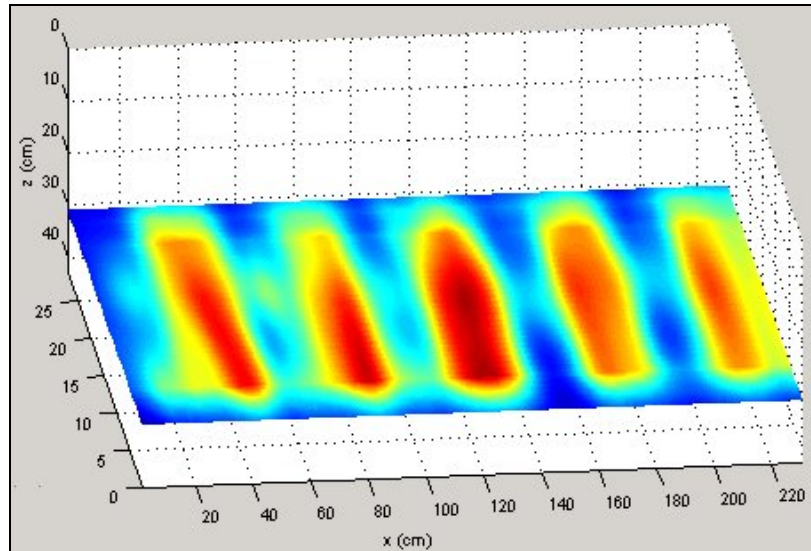


**Fig. 14** - Ex refettorio. La termografia ha evidenziato una netta discontinuità delle caratteristiche termiche della cornice superiore da entrambi i lati della sala.

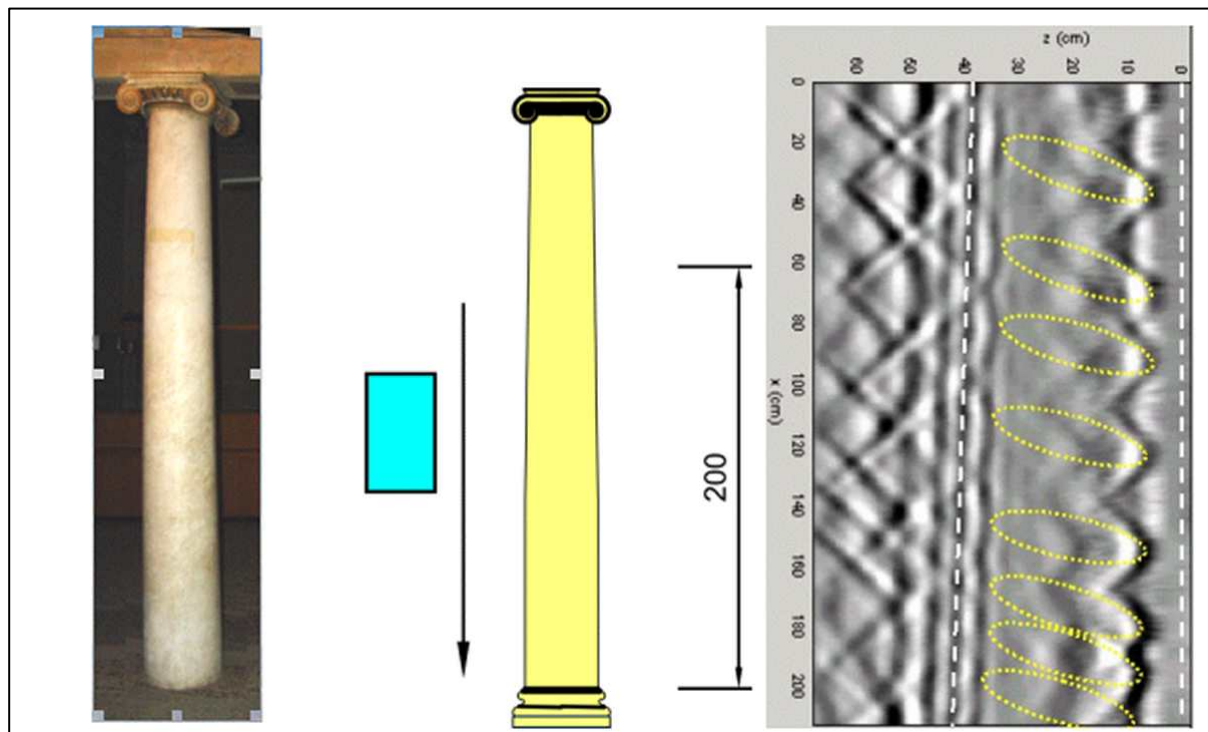


## Travatura nella pavimentazione

Un altro carattere importante da investigare è definire la travatura che sostiene le pavimentazioni in legno, ossia determinare il numero dei travetti e la loro posizione. L'applicazione del GPR è estremamente efficace perché con un metodo non distruttivo è possibile localizzare la travatura in modo estensivo e certo (Fig. 15)



**Fig. 15** - 3D di una sezione orizzontale prodotta con antenna da 1GHz. In evidenza si hanno 5 travi che sostengono la pavimentazione.



**Fig. 16** - Sono state realizzate delle misure GPR con antenna da 1 GHz dall'alto verso il basso. L'aumento della dimensione della colonna (linea tratteggiata bianca) è dovuto al fatto che la colonna non è a sezione costante; questo fa sembrare che anche le cerchiature metalliche (indicate con i cerchi gialli tratteggiati) non siano orizzontali mentre in realtà lo sono.

## **Materiali e tecnica di costruzione delle colonne**

Sono state indagate le colonne di granito e di “marmorino” presenti nella Villa. Sulle prime sono state condotte delle indagini ultrasoniche per cercarne i difetti, le seconde sono state indagate con il GPR per definirne la tecnica costruttiva. Queste ultime si sono rivelate essere costituite da un rivestimento che simula l'effetto del marmo e si poggia su una struttura armata bene individuata acquisendo dei profili GPR verticali lungo le colonne con antenna da 1 GHz (Fig. 16).

## **CONCLUSIONI**

Il caso qui discusso ha dimostrato come alcuni problemi legati all'individuazione di elementi subsuperficiali nascosti dalla muratura (catene metalliche, presenza di vuoti, distacchi dell'intonaco, tessitura muraria, etc.) possono essere affrontati efficacemente mediante l'utilizzo della termografia, mentre problematiche connesse all'individuazione e alla misura di elementi più profondi (elementi metallici, presenza di vuoti, morfologia delle volte, etc.) possono essere affrontate mediante l'uso del georadar.

Un utilizzo congiunto di termografia e georadar, può quindi ridurre notevolmente il tempo necessario per le indagini. Inoltre, l'utilizzo combinato delle due tecniche può semplificare molto l'interpretazione delle misure, contribuendo a contenere i costi complessivi delle operazioni di indagine diagnostica.

I limiti della termografia sono legati alla profondità di penetrazione dell'indagine, limitata da pochi centimetri fino a pochi decimetri nel caso di misure in transitorio termico con riscaldamento artificiale. Il georadar, al contrario, non è limitato nella penetrazione, ma richiede un contatto diretto con le superfici da indagare e tempi molto più lunghi per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati.

In definitiva, la tecnica termografica può essere utilizzata estensivamente come screening preliminare e per ricercare elementi e strutture nascoste subsuperficiali, mentre la prospezione GPR può essere utilizzata come indagine di dettaglio per studiare più approfonditamente alcuni problemi o per determinare la posizione 3D delle strutture stesse.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Binda L., Saisi A., Ludwig N., Maierhofer C., Leopold S. and Schaurich D.; 1998: Combination of non-destructive testing methods for the characterisation of the moisture content and distribution in a historic brickwall. Proceedings of the 2nd Int. RILEM Conf. on Rehabilitation of Structures, Highett, Australia, pp. 112-129.
- Boriani M., Moranti C. and Rossari A.; 1986: Milano contemporanea. Itinerari di architettura e urbanistica. Designers Riuniti Editori, Torino.
- Breymann G. A.; 1881: Trattato generale di costruzioni civili: con cenni speciali intorno alle costruzioni grandiose. Milano, Francesco Vallardi.
- Colla C., Das P.C., McCann D. and Forde M.C.; 1997: Sonic, electromagnetic & impulse radar investigation of stone masonry bridges. Non-destructive testing and evaluation International, Vol. 30, N. 4, pp. 249-254.
- Langè S.; 1972: Ville della Provincia di Milano: Lombardia. SISAR.
- Saisi, A., Valle S., Zanzi L. and Binda L.; 2001: Radar and Sonic as Complementary and/or Alternative Tests in the Survey of Structures. Int. Cong. "More than Two Thousand Years in the History of Architecture Safeguarding the Structure of our Architectural Heritage", Bethlehem, (Palestine), Vol. 1, Section 1b 6.