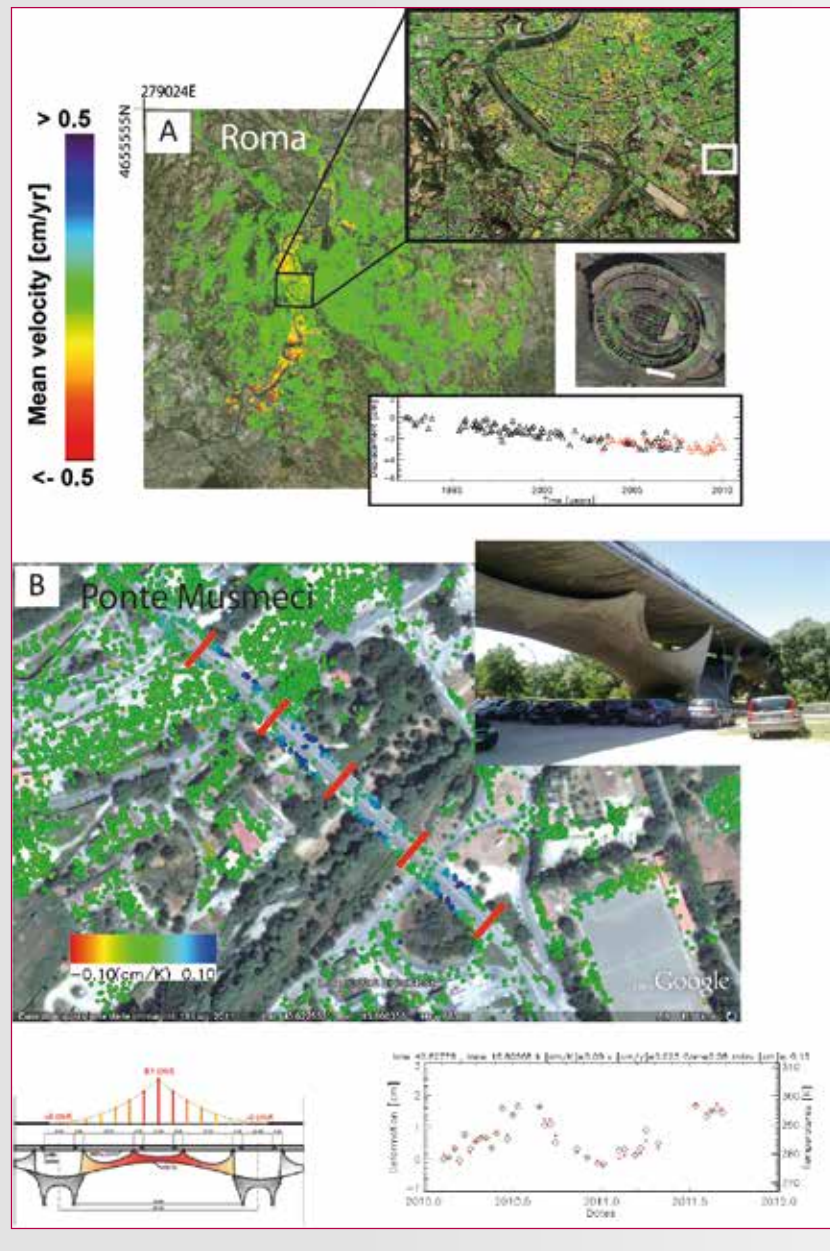


## LE TECNOLOGIE DI OSSERVAZIONE DELLA TERRA E DI DIAGNOSTICA ELETTROMAGNETICA AL SERVIZIO DEI BENI CULTURALI L'ESPERIENZA DELL'IREA-CNR

di Francesco Soldovieri, Romeo Bernini, Manuela Bonano, Ilaria Catapano, Gianfranco Fornaro, Maria Consiglia Rasulo, Olga Zeni e Riccardo Lanari

L'IREA-CNR sviluppa metodologie e tecnologie per l'acquisizione, l'elaborazione, la fusione e l'interpretazione di immagini e dati ottenuti utilizzando sensori per il monitoraggio dell'ambiente e del territorio nonché per la valutazione del rischio elettromagnetico.



L'Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA) sviluppa ormai da più di un decennio metodologie per elaborare, interpretare e rendere disponibili dati provenienti da sensori operanti da satellite, aereo e in situ, per la sorveglianza e la gestione del territorio, la sicurezza e la valutazione dei rischi, compreso quello elettromagnetico. Inoltre, vengono sviluppate metodologie e tecnologie per la realizzazione di infrastrutture di dati geo-spaziali e per applicazioni biomedicali dei campi elettromagnetici. L'istituto, costituito nel 2001, rappresenta un'eccellenza della ricerca scientifica e tecnologica del nostro Paese. Con sede istituzionale a Napoli, sede secondaria a Milano e la stazione sperimentale "Eugenio Zilioli" a Sirmione del Garda (Bs), l'IREA contribuisce a dare risposte a problematiche di notevole importanza in relazione alle sfide sociali in diversi settori che vanno dal monitoraggio del territorio e dell'ambiente, alla sicurezza, alla protezione delle infrastrutture strategiche. Fra le attività svolte assume particolare importanza lo sviluppo di tecnologie di osservazione della terra e di close sensing per la gestione sostenibile e la protezione dei Beni Culturali.

Fig. 1 - A) analisi SBAS-DInSAR relativa al centro urbano di Roma, ottenuta sfruttando dati SAR ERS/ENVISAT acquisiti nel periodo 1992-2010. Mappa geocodificata della velocità di deformazione sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area investigata, con il particolare del Colosseo e la serie storica di deformazione relativa a un punto localizzato in corrispondenza dell'anello esterno (in nero i dati ERS e in rosso i dati ENVISAT); B) distribuzione spaziale sul Ponte sul Basento (Potenza) del coefficiente di dilatazione termica stimato grazie all'elaborazione tomografica, sovrapposta ad una immagine ottica (in alto); sono inoltre mostrati lo schema di una campata del ponte ed il confronto tra la serie storica della deformazione totale (diamanti neri) e della sola componente di dilatazione termica (asterischi rossi).

Una corretta gestione dei beni architettonici ed archeologici non può prescindere dalla messa in sicurezza degli stessi. A tal fine, è necessaria una diagnostica capace di fornire un'accurata conoscenza dello stato degli edifici durante il loro normale ciclo di vita, con particolare riferimento all'identificazione della loro tipologia costruttiva, laddove non nota, ed all'individuazione delle cause, dell'estensione e della natura di possibili danni o situazioni di degrado. Ciò consente un monitoraggio della struttura al fine di prevedere l'andamento temporale dello stato di degrado o di possibili fenomeni precursori di situazioni di pericolo. Infine, è di interesse l'esigenza di fornire risposte in termini di "quick damage assessment", a seguito di un evento di crisi sia di origine naturale (sismico, idrogeologico,..) che di natura antropica, al fine di stabilire un corretto ordine di priorità nella fase di gestione post-crisi, sia in termini di oggetti che di interventi.

La natura multi-disciplinare dell'IREA ha permesso di concentrare gli sforzi sullo sviluppo di un approccio sistemico per la conservazione e la mitigazione dei rischi naturali ed antropici per i beni culturali mobili e immobili. Tale obiettivo è stato perseguito grazie allo sviluppo ed all'integrazione di tecniche di sensing elettromagnetico basate su sistemi radar e sensoristica in fibra ottica capaci di una diagnostica ed un monitoraggio non invasivo.

In particolare, le tecniche di telerilevamento radar da satellite e da piattaforme aeree hanno il vantaggio di fornire una "visione" globale relativa a grandi aree, anche di dimensioni di decine di chilometri e con una risoluzione spaziale che arriva al metro, consentendo in tal modo di accoppiare la sorveglianza su larga scala del territorio con il monitoraggio ad una scala di dettaglio della singola struttura. Ciò permette sia di analizzare la stabilità strutturale del bene, sia gli effetti indiretti di eventuali movimenti del sottosuolo, legati ad esempio a scavi, variazione di parametri idro-geofisici ed altri fattori di rischio. Complementari alle tecnologie appena citate sono le metodologie di diagnostica elettromagnetica in situ sviluppate presso l'IREA. Esse si pongono in contrapposizione a quelle cosiddette "distruttive" in quanto non richiedono il prelievo di campioni, che possono talvolta interessare l'intero spessore della struttura, oppure la realizzazione di fori di ispezione o ancora l'esecuzione di tagli.

Va infine sottolineato, come le attività IREA si siano concentrate sul problema dell'integrazione delle diverse tecnologie di sensing, con l'obiettivo di un monitoraggio multi-scala (visione globale e locale), multi-risoluzione, a livello sia superficiale che sub-superficiale, sia del bene che del territorio circostante. Un ulteriore aspetto riguarda anche lo sviluppo di approcci non invasivi basati sull'uso delle radiofrequenze/microonde per la conservazione del bene.

Sintetizzando, le attività di ricerca dell'IREA hanno come obiettivo lo sviluppo e l'adattamento delle tecnologie di sensing elettromagnetico all'ambito della diagnostica e del monitoraggio dei beni culturali, con particolare riferimento allo sviluppo di approcci di data processing a partire da misure in situ e in remoto ed allo studio di approcci di data correlation e information fusion per l'integrazione

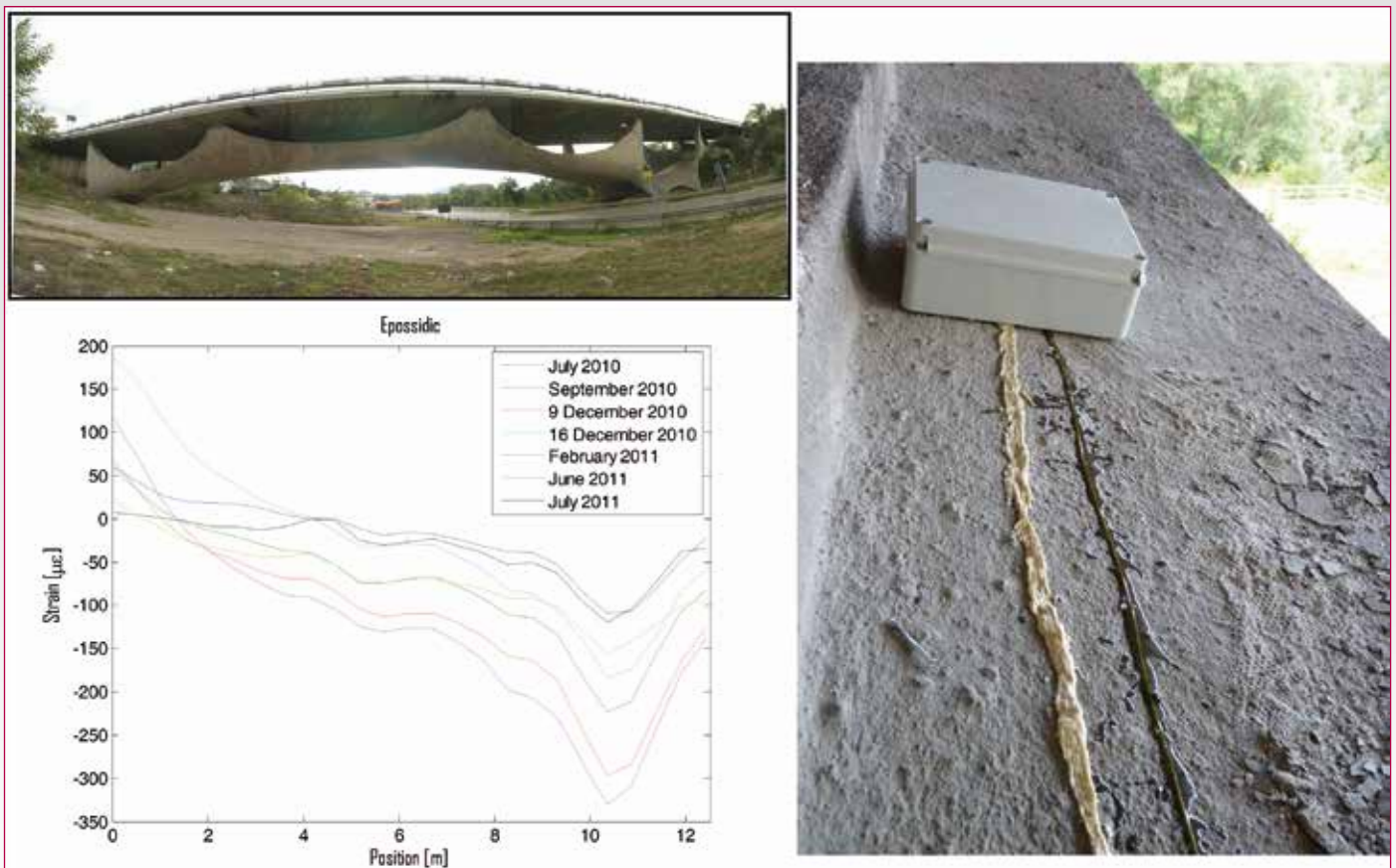


Fig. 2 - Misura delle deformazioni del Ponte sul Basento attraverso il sensore distribuito in fibra ottica sviluppato presso l'IREA.



di dati ottenuti dai differenti sensori. Tale approccio consente quindi di dare risposta alle diverse esigenze degli stakeholders in termini di:

- i) analisi del manufatto con particolare attenzione all'ottenimento di informazioni sulla sua storia dal punto di vista costruttivo (tipologia costruttiva, materiali..) ed alla comprensione del comportamento statico/strutturale, grazie all'impiego congiunto di fonti storiche e di tecnologie non distruttive di diagnostica e monitoraggio;
- ii) assessment del rischio, sia durante il normale ciclo di vita, sia a seguito di eventi di crisi, con riferimento alle aree circostanti al bene, mediante tecnologie capaci di dare una visione multi spaziale e multi risoluzione del territorio;
- iii) supporto al planning e design degli eventuali interventi di restauro e rinforzo;
- iv) verifica della bontà degli interventi di restauro.

### ATTIVITÀ DI RICERCA CORRENTI

Questa sezione ha l'obiettivo di descrivere in modo sintetico alcuni temi di ricerca attivi presso l'IREA, nell'ambito dei quali sono stati prodotti recentemente importanti risultati.

### RADAR AD APERTURA SINTETICA

Il Radar ad Apertura Sintetica (SAR) è un sistema di telerilevamento attivo alle microonde, che permette di misurare la distanza tra il sensore e il target sfruttando il segnale elettromagnetico retrodiffuso dalla superficie terrestre. L'elaborazione coerente di tale segnale consente di ottenere immagini radar complesse ad alta risoluzione spaziale della scena osservata, indipendentemente dalle

condizioni meteorologiche o dalla presenza di una sorgente luminosa esterna, con un monitoraggio giorno/notte pressoché continuo.

Una delle principali applicazioni della tecnologia SAR è rappresentata dalla tecnica denominata Interferometria SAR Differenziale (DInSAR), che permette di generare mappe di deformazione della superficie terrestre ("interferogrammi") sfruttando coppie d'immagini SAR acquisite in istanti differenti e da posizioni orbitali diverse, con un'accuratezza anche di pochi millimetri.

In tale settore l'IREA ha una consolidata esperienza, testimoniata dalla significativa produzione scientifica. Inoltre, nel 2001 l'IREA ha sviluppato la tecnica DInSAR denominata Small Baseline Subset (SBAS) che, combinando opportunamente sequenze di immagini SAR acquisite nel tempo, consente di seguire l'evoluzione temporale dei fenomeni deformativi in contesti sia naturali sia urbani, massimizzando il numero dei punti di misura per i quali l'informazione risulta affidabile (punti coerenti). In particolare, la tecnica SBAS consente di generare mappe di spostamento del suolo e serie storiche di deformazione; inoltre, è possibile "zoomare" in aree sensibili e rilevare fenomeni deformativi in aree urbanizzate e d'interesse storico, alla scala del singolo edificio o infrastruttura. In tale contesto, l'IREA ha messo a punto una catena di elaborazione SBAS-DInSAR che, partendo dai dati grezzi acquisiti dai tutti i sistemi SAR civili oggi disponibili, consente di arrivare alla generazione di mappe geocodificate di deformazione. Come evoluzione delle tecniche d'Interferometria DInSAR multipassaggio per monitoraggio di deformazioni, sono stati sviluppati approcci basati sul recente concetto della tomografia SAR. Nello specifico, si parla di metodi innovativi di "tomografia SAR differenziale" che consentono di

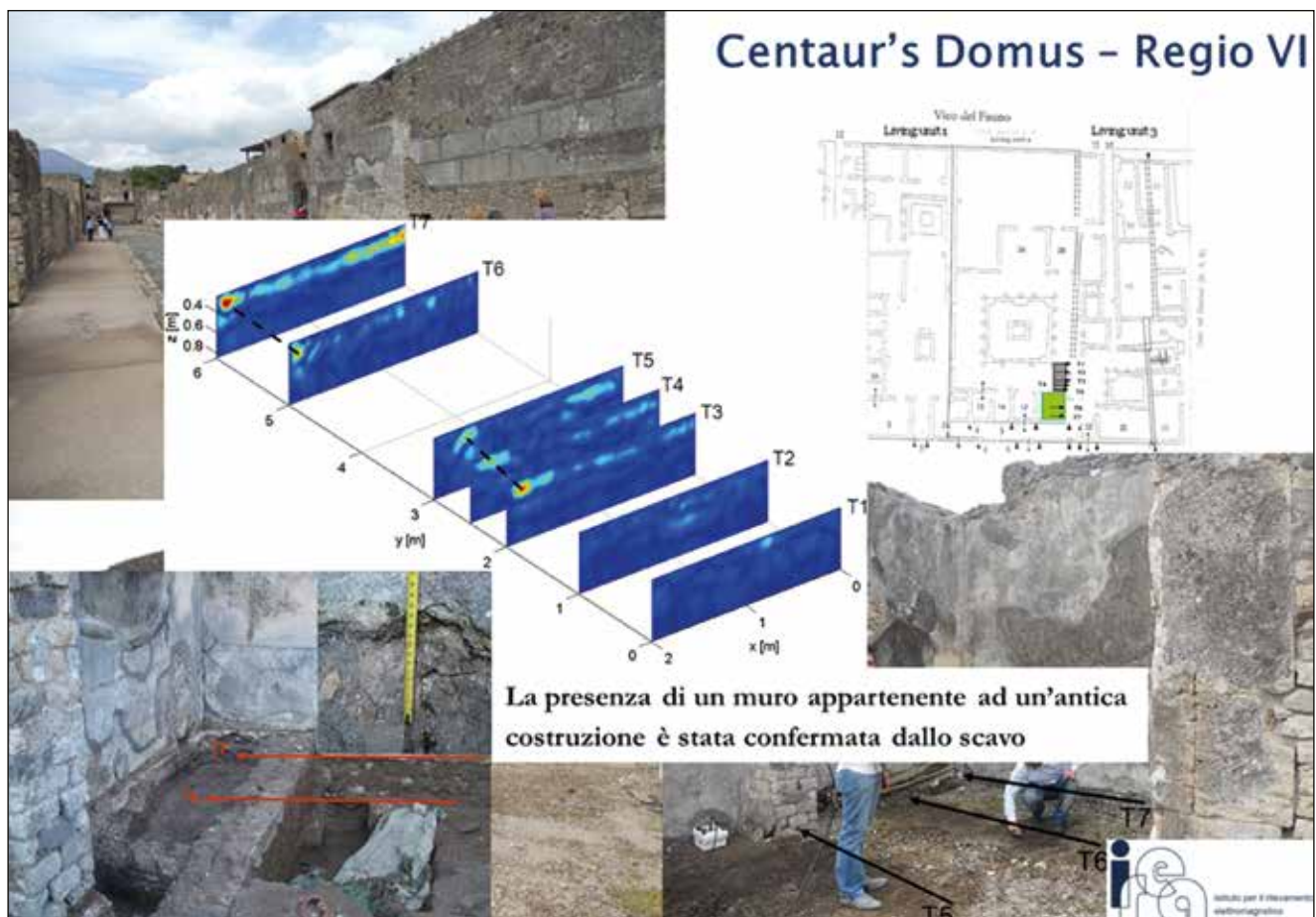


Fig. 3 - Prospezione georadar (in collaborazione con l'Università degli Studi di Napoli "L'Orientale" e la Seconda Università di Napoli) presso la Domus del Centauro a Pompei. La prospezione georadar ha evidenziato l'esistenza di un frammento di muro sepolto, confermata dal successivo scavo, ed è stata importante nel confermare le informazioni sulla struttura preesistente alla domus romana.

realizzare un radar scanner dallo spazio in grado di ricostruire la forma tridimensionale delle strutture e monitorare le deformazioni lente nel tempo con una elevata densità spaziale. I metodi tomografici differenziali permettono di migliorare significativamente l'analisi rispetto agli approcci

classici, soprattutto per le scene complesse come le aree urbane e le infrastrutture.

In Figura 1 sono riportati alcuni esempi che mostrano l'efficacia delle tecniche SBAS-DInSAR e tomografica in contesti urbani e d'interesse storico.

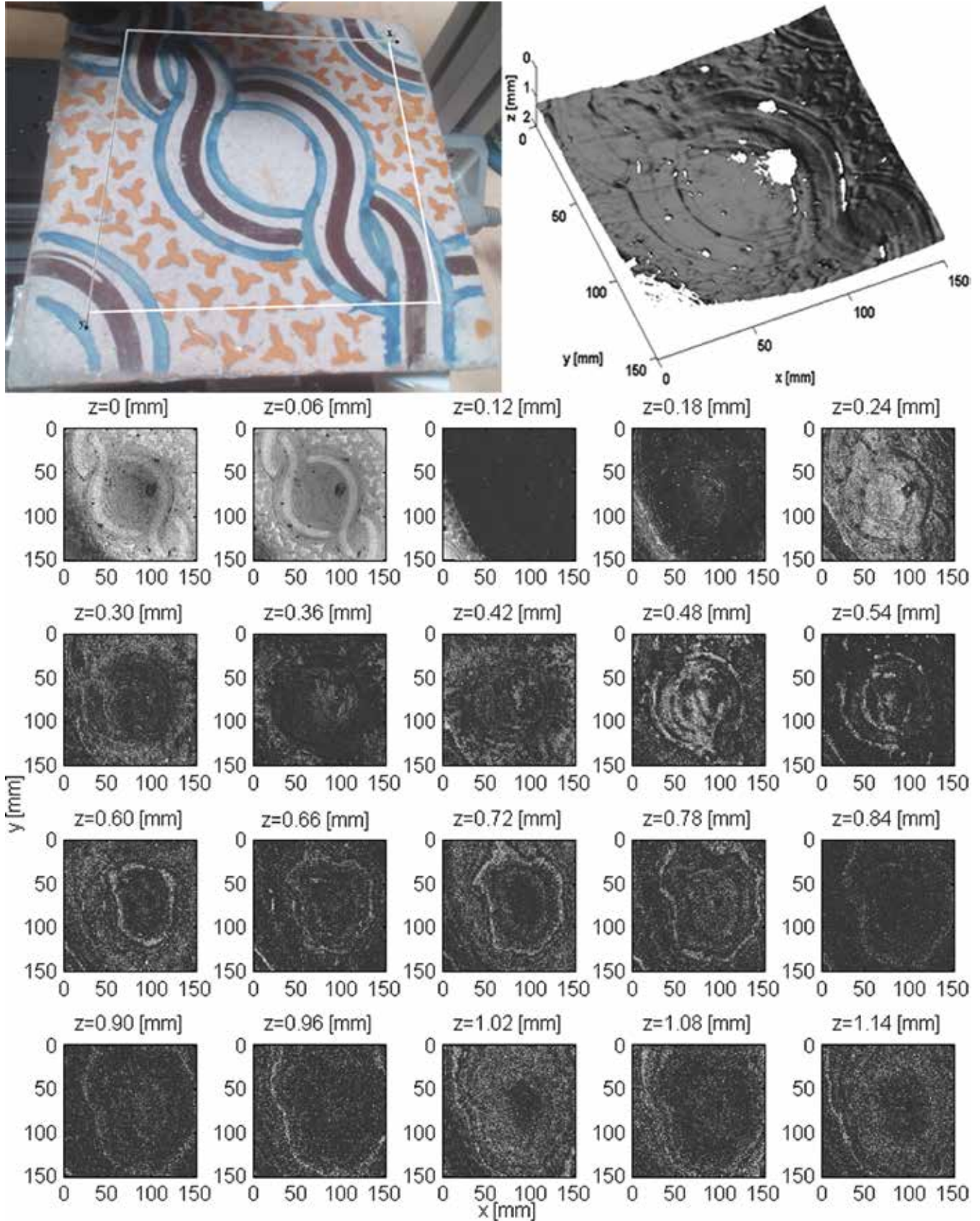


Fig. 4 - Indagine ai THz di una maiolica prodotte a Napoli nel XIX secolo. Dall'angolo in alto a sinistra: fotografia della maiolica, topografia prodotta dall'indagine ai THz, immagini della struttura interna a partire della superficie ed al crescere della profondità. Tale risultato ha consentito di acquisire informazioni sulle modalità costruttive e sull'entità del degrado.



## SENSORISTICA IN FIBRA OTTICA

I sensori in fibra ottica sviluppati presso l'IREA ricadono nell'ambito dei cosiddetti "sensori distribuiti", per la loro capacità di monitorare con continuità spaziale la struttura investigata su distanze fino a decine di chilometri. Il sensore è costituito da una comune fibra ottica collegata solidalmente all'edificio ed interrogata mediante segnali ottici prodotti da una sorgente laser. Tali sensori sono caratterizzati dall'avere piccole dimensioni e basso costo, dall'essere chimicamente e meccanicamente compatibili con molti materiali e dall'essere immuni alle interferenze elettromagnetiche; pertanto, rappresentano una soluzione ideale per costruire reti di monitoraggio molto estese. Presso l'IREA esiste in una consolidata esperienza nello sviluppo e applicazione di sensori distribuiti in fibra ottica basati sul fenomeno dello scattering di Brillouin. Tale fenomeno, intrinsecamente presente anche nelle fibre ottiche commerciali, consente il monitoraggio su distanze che possono arrivare a decine di chilometri delle deformazioni e /o della temperatura della struttura investigata. Sono stati sviluppati diversi prototipi utilizzati per il monitoraggio di deformazioni di grandi strutture quali ponti, viadotti e per il monitoraggio su lunga distanza della temperatura. In particolare, un prototipo è stato impiegato in condizioni operative per il monitoraggio delle deformazioni di una volta del Ponte sul Basento a Potenza che, oltre ad essere la principale via di accesso alla città, rappresenta una delle opere architettoniche più visionarie del noto ingegnere (civile e navale) Sergio Musmeci. La Figura 2 mostra sia la volta dove è stato installato il sensore, sia il risultato della misura dalla quale è stato possibile desumere la presenza di una fratturazione incipiente degli strati superficiali del manufatto.

## GEORADAR

Il georadar o GPR (Ground Penetrating Radar) si comporta come un "classico" sistema radar ed è costituito da un'antenna trasmittente, che invia un segnale interrogante nel mezzo investigato, ed una o più antenne riceventi che registrano gli echi prodotti in superficie dall'interazione dell'onda elettromagnetica con la regione investigata. La principale limitazione legata all'impiego del GPR è legata al fatto che le tecniche di elaborazione comunemente utilizzate si basano essenzialmente su una "lettura" diretta dei cosiddetti radargrammi. Tale metodologia di elaborazione è fortemente dipendente dall'interpretazione dell'operatore e può risentire della mancanza di informazioni sulla struttura investigata. Le attività di ricerca svolte presso l'IREA mirano al superamento di tale limitazione e consentono una diagnostica affidabile, accurata, ad alta risoluzione ed user-friendly. Tale obiettivo viene perseguito attraverso tecniche innovative di elaborazione dati, basate sulla tomografia a microonde, capaci di fornire "immagini" di semplice interpretazione in termini di presenza, localizzazione e caratterizzazione della geometria degli oggetti sepolti e/o presenti all'interno della struttura (rappresentative di intercapedini, interfacce tra materiali diversi, difetti localizzati...). L'IREA ha sviluppato negli anni approcci tomografici per l'imaging 2D e 3D ormai largamente impiegati in scenari operativi sia per la prospezione archeologica, sia per la diagnostica di manufatti. A titolo di esempio, viene mostrato in Figura 3 il risultato di una prospezione GPR effettuata a Pompei presso la Domus del Centauro.

## IMAGING AI TERAHERTZ

L'uso di segnali elettromagnetici a frequenze comprese tra 0.1THz e 30THz è alla base di tecnologie emergenti per l'analisi non invasiva di manufatti di pregio (come dipinti, mosaici e opere d'arte in genere) al fine di ottenere informazioni utili sulla struttura, sulla tecnica, sui materiali costruttivi e sullo stato di conservazione dell'oggetto. In confronto alle tecniche diagnostiche basate su raggi X o ultravioletti, la tecnologia ai THz si basa sull'uso di radiazioni non ionizzanti e, quindi, consente di ridurre il rischio di un deterioramento dell'opera per effetto dell'analisi stessa. Inoltre, i recenti sviluppi tecnologici hanno portato alla messa a punto di sistemi flessibili, di facile utilizzo e portabili da poter impiegare in-situ. Ciò rappresenta un intrinseco e significativo vantaggio nel caso di beni artistici non trasportabili quali, ad esempio, affreschi e mosaici. Esempi allo stato dell'arte dell'uso di tecnologie ai THz nell'ambito dei beni culturali riguardano l'analisi di opere d'arte come papiri, dipinti, affreschi e reperti archeologici, finalizzate da un lato alla generazione di immagini che consentano di visualizzare la struttura interna dell'opera, possibili deterioramenti ed eventuali particolari non direttamente osservabili e, dall'altro, ad analisi spettroscopiche per la caratterizzazione dei materiali utilizzati.

Presso l'IREA è, disponibile un sistema ai THz di ultima generazione per l'imaging real-time e la spettroscopia ad alta velocità, che consente di lavorare in diverse configurazioni di misura. Tale sistema è stato recentemente usato per investigare manufatti in ceramica (maioliche) prodotti tra il XVIII e XIX secolo ed acquisire informazioni utili a delineare l'evoluzione storica delle modalità costruttive (vedi Figura 4).

## UTILIZZO DELLE MICROONDE E DELLE RADIOFREQUENZE PER LA DISINFESTAZIONE NON INVASIVA DI MANUFATTI ARTISTICI

La presenza di specie infestanti (muffe, funghi) e i parametri ambientali (umidità) sono determinanti nel processo di deterioramento di beni di interesse artistico-culturale (pietre monumentali, affreschi, oggetti lignei). I metodi di disinfestazione comunemente utilizzati comprendono trattamenti chimici e fisici che spesso risultano tossici per l'ambiente e l'operatore e che possono danneggiare i beni trattati. In tale contesto, le radiofrequenze (RF) e le microonde (MW) offrono la possibilità di sviluppare tecnologie non invasive che sfruttano l'assorbimento di energia elettromagnetica da parte dell'acqua per indurre il riscaldamento selettivo delle forme biologiche infestanti al di sopra della loro temperatura letale, in assenza di riscaldamento significativo dei materiali inorganici. I trattamenti a MW sono stati applicati con successo a manufatti lignei e statue.

La definizione di metodi di trattamento a RF/MW per la disinfestazione di opere d'arte non può prescindere dalla conoscenza delle proprietà termiche ed elettromagnetiche delle specie infestanti e delle strutture ospitanti. Tali informazioni vengono utilizzate in studi di dosimetria numerica e sperimentale, allo scopo di definire il pattern di deposizione dell'energia elettromagnetica ed i fenomeni di diffusione termica nei materiali di interesse, ed individuare parametri di trattamento (frequenza, potenza, durata e modalità di irradiazione) efficaci per la disinfestazione dei manufatti, senza alterarne le caratteristiche.

## PROGETTI E COLLABORAZIONI SCIENTIFICHE

L'IREA ha partecipato a diversi progetti europei e nazionali riguardanti le tematiche della diagnostica per i beni culturali ed il patrimonio costruito (<http://goo.gl/jcZZi>).

L'IREA coordina il Settore Guida "Sicurezza integrata dei beni culturali e del costruito" nella piattaforma tecnologica nazionale sulla Sicurezza SERIT ([www.piattaformaserit.it](http://www.piattaformaserit.it)). Inoltre, IREA partecipa al Distretto ad Alta Tecnologia dei Beni Culturali (DATABENC) promosso dalla Regione Campania ([www.databenc.it](http://www.databenc.it)). Sono attive collaborazioni con storici dell'arte e archeologi in Italia e all'estero. Recentemente è stata attivata una convenzione con la Soprintendenza Speciale per Pompei, Ercolano e Stabia.

#### PREMI

A conferma dell'elevato impatto dei risultati ottenuti con riferimento a tematiche relative ai beni culturali, il laboratorio dell'IREA denominato "Radar per applicazioni di sicurezza e monitoraggio del territorio" ha ricevuto il SERIT Award 2012 per il laboratorio pubblico e / o privato italiano che si è distinto per la ricerca e l'innovazione nel campo della sicurezza (<http://goo.gl/i0acX4>).

Inoltre, ricercatori IREA sono stati premiati per Best papers su riviste prestigiose quali IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters (<http://goo.gl/eyqQie>) e Journal of Geophysics and Engineering (<http://goo.gl/AupAlx>).

L'articolo "Le tecnologie di osservazione della terra e di diagnostica elettromagnetica al servizio dei beni culturali: l'esperienza dell'IREA-CNR" è il secondo della serie tematica curata da Luca Papi (CNR) dedicata a cinque Laboratori del Consiglio Nazionale delle Ricerche, il più grande Ente Pubblico di Ricerca italiano.

I direttori dei singoli laboratori sono chiamati a descrivere le competenze, le attività di ricerca, i progetti, le collaborazioni nazionali e internazionali delle strutture di cui sono responsabili.

#### ABSTRACT

*IREA (an Institute of the Italian National Research Council) develops methodologies and technologies for acquisition, processing, fusion and interpretation of images and data obtained by using electromagnetic sensors (operating on satellite, aircraft and in situ), aimed at monitoring environment and territory, at non-invasive diagnostic and at electromagnetic risk assessment. These scientific activities have a significant follow-up in the fields of Cultural Heritage (CH) monitoring and protection. IREA is an excellence level Institute with a very solid international visibility, gained thanks to a very good scientific production and through the involvement in national and international projects. IREA is also involved in the organization of scientific events, conferences, summer schools and contributes to the editorial board of several international journals. Awards have been assigned to IREA laboratories and researchers who collaborate with many CH institutions in Italy and abroad.*

#### PAROLE CHIAVE

REMOTE SENSING TECHNOLOGIES; ELECTROMAGNETIC DIAGNOSTICS; CH MONITORING AND PROTECTION; CNR- IREA

#### AUTORE

FRANCESCO SOLDOVIERI  
 ROMEO BERNINI  
 MANUELA BONANO  
 ILARIA CATAPANO  
 GIANFRANCO FORNARO  
 MARIA CONSIGLIA RASULO  
 OLGA ZENI  
 RICCARDO LANARI

MBOX@IREA.CNR.IT  
 LANARI.R@IREA.CNR.IT

