

# Indagini geofisiche del sottosuolo della cattedrale metropolitana di San Pietro e della Basilica di Santa Maria Maggiore in Bologna

Alessandro Maestri<sup>1</sup>, Francesco Mulargia<sup>2</sup>, Paola Romito<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laureati in Scienze Geologiche, Università di Bologna

<sup>2</sup> Professore, Dipartimento di Fisica, Sezione di Geofisica, Università di Bologna

## 1. PREMESSA

La Cattedrale di San Pietro e la Basilica di Santa Maria Maggiore sono tra le chiese più antiche della città di Bologna. La loro storia architettonica annovera una sequela di restauri, ricostruzioni e ristrutturazioni, di cui spesso non rimane che qualche minimo indizio archeologico e documentale.

Alla ricerca di evidenze più precise, abbiamo studiato il suolo al disotto delle chiese.

Poichè un'indagine diretta tramite scavi non era ovviamente ipotizzabile, ci siamo basati su indagini non invasive, utilizzando le due tecniche geofisiche più moderne applicabili al rilievo archeologico (vedi Castellaro et al., 2008), il GPR e la Sismica Passiva.

I risultati ottenuti fanno luce su alcune delle vicende costruttive delle chiese e sulla loro storia, ed evidenziano anche i limiti intrinseci delle tecniche utilizzate.

## 2. IL GPR

Il GPR (*Ground-Penetrating Radar*), più comunemente noto come *georadar*, basa il suo funzionamento sulla immissione nel sottosuolo, e successiva riflessione, di onde elettromagnetiche ad alta frequenza, generalmente tra 25 e 1000 MHz.

Queste onde, prodotte da opportuni circuiti elettronici e "sparate" da un'antenna trasmittitrice, viaggiano nel sottosuolo con velocità  $V$  pari al rapporto fra  $c$  (la velocità della luce nel vuoto,  $3 \cdot 10^8$  m/s) e la radice di  $\epsilon$ , la *costante dielettrica* del mezzo.

Quando l'onda incontra un altro mezzo la cui costante dielettrica è diversa, essa viene in parte riflessa.

Quindi, l'interfaccia tra due strati di materiali differenti dà luogo ad un'onda riflessa che torna in superficie, dove può essere registrata da un'antenna ricevente sintonizzata sulla stessa frequenza.

Misurando il tempo  $t_{a-r}$  tra l'emissione e la ricezione dell'onda, e conoscendo la costante dielettrica del mezzo, è immediato calcolare la profondità dello strato riflettente  $h_1$ :

$$h_1 = \frac{t_{a-r}(c\sqrt{\epsilon_1})}{2}$$

Ovviamente, come avviene per ogni metodo geofisico, anche il GPR ha dei limiti importanti rispetto ad un'indagine diretta. Innanzitutto, non "vede" litologie diverse, ma solo contrasti di costante dielettrica.

Quindi, se due litologie hanno una costante dielettrica uguale, la loro interfaccia risulterà trasparente e del tutto invisibile.

Allo stesso modo, la presenza di uno strato di materiale conduttivo può "schermare" tutto quello che c'è sotto, il che porta ad una marcata dipendenza dalle condizioni di umidità.

Nelle indagini GPR, il parametro fondamentale è la frequenza dell'antenna emettitrice-ricevente.

Infatti, maggiore è questa frequenza, migliore è il potere risolutivo ma minore la capacità di penetrazione.

Viceversa, diminuendo la frequenza si diminuisce la risoluzione ma si aumenta la profondità di indagine.

Visti gli scopi del nostro rilievo, si è optato per un'antenna da 400 MHz, che consente di investigare approssimativamente sino a 3 - 4 metri di profondità con una risoluzione dell'ordine di una decina di centimetri.

È opportuno tenere presente che le misure GPR riguardano i tempi di tragitto delle onde.

Tradurre questi tempi in profondità richiede (vedi l'equazione precedente) la conoscenza della costante dielettrica del mezzo, quanto meno nel primo strato. In linea di principio, è possibile rifarsi a valori tabulati, ma di fatto la procedura più conveniente è stimare la costante dielettrica dal confronto dell'immagine GPR con la stratigrafia reale in un punto in cui è disponibile una misura diretta.

Occorre infine notare che le immagini GPR necessitano comunque di un minimo di interpretazione: le interfacce di strato appaiono come riflettori piani continui, mentre elementi puntuali o a sezione non costante generano iperboli di riflessione.

### 3. LA SISMICA PASSIVA

La Sismica Passiva utilizza la registrazione del *microtremore*, antropiche sempre presente ovunque per cause sia naturali che antropiche, per dedurre la stratigrafia del sottosuolo.

Nel caso della prospezione passiva a *stazione singola* utilizzata in questo studio, si opera una vera e propria *analisi ecografica* del sottosuolo, utilizzando come funzione di eccitazione il rumore sismico ambientale per ricostruire il campo d'onde di superficie che lo compone.

In pratica, il microtremore viene registrato in un insieme di singoli punti da sismografi digitali portatili tridimensionali ad alta sensibilità (*Tromino*).

Il segnale registrato viene poi invertito tramite complessi programmi di calcolo per ricostruire la stratigrafia del sottosuolo attraverso il *fit* spettrale delle autofunzioni del mezzo, rappresentato localmente come un mezzo elastico stratificato secondo la teoria dei propagatori di Haskell-Thomson.

In particolare, in questo studio si è utilizzato a tal scopo il modulo di *fit* dei rapporti spettrali H/V del software *Grilla*.

Anche la Sismica Passiva ha ovviamente limiti importanti rispetto ad un'indagine diretta. In pratica, neanche essa "vede" litologie diverse, ma soltanto mezzi con rigidità differenti.

Quindi, se due litologie hanno una uguale rigidità, la loro interfaccia risulterà del tutto invisibile.

È opportuno anche notare come la Sismica Passiva "veda" le proprietà meccaniche mentre le indagini GPR "vedano" le proprietà elettriche.

Le due indagini sono quindi a volte in grado di rilevare gli stessi oggetti, ad esempio le cavità, i cui bordi rappresentano un forte contrasto di costante dielettrica che di rigidità meccanica.

Viceversa, alcuni oggetti sono rilevati dall'una e non dall'altra e anche i limiti delle due tecniche sono molto diversi, come, ad esempio, una totale indipendenza della Sismica Passiva dal contenuto in acqua del sottosuolo al contrario della forte dipendenza del GPR.

In questo senso, le due tecniche possono essere ritenute complementari e vanno idealmente utilizzate assieme.

Di fatto, visti i costi molto inferiori della Sismica Passiva rispetto al GPR, appare logico che la prima accompagni sempre la seconda.

Anche per la Sismica Passiva occorre tenere presente la natura ondulatoria della misura, per cui la frequenza del segnale gioca un ruolo centrale.

Di fatto, quello che si misura è l'insieme delle autofrequenze in ciascun punto.

Tradurre queste autofrequenze in profondità richiede la conoscenza della velocità delle onde di superficie nel mezzo, quanto meno nel primo strato.

Anche qui è possibile rifarsi a valori tabulati, oppure ricavare la velocità delle onde di superficie nel primo strato da misure indipendenti ma, in pratica, la procedura di gran lunga più conveniente ed efficace è stimare la velocità nel primo strato effettuando una misura di taratura in un punto in cui è disponibile anche un rilievo diretto (Castellaro e Mulargia, 2009a).

### 4. LA STORIA DELLE CHIESE

Il primo impianto della cattedrale metropolitana di San Pietro viene comunemente datato al X secolo, anche se le sue origini rimangono tutt'ora incerte poiché non ci sono documenti precedenti riguardo alla sua esistenza (Terra, 1997).

Nel '900 venne comunque avanzata l'ipotesi che San Pietro fosse stata cattedrale sin dai tempi della sua prima costruzione, attorno al IV-V secolo d.C., ipotesi sinora non confermata (Fanti, 1995; Terra, 1997).

È certo invece che nel 1141 la struttura fu distrutta da un incendio e ricostruita poi interamente in stile romanico.

In questo stile rimase il corpo principale della chiesa fino al 1599 quando, nel tentativo di utilizzare i materiali della vecchia chiesa per rimodernarla, vennero tolti i pilastri che reggevano la navata centrale.

Nonostante il rinforzo degli altri pilastri, i calcoli del progettista, l'architetto Fiorini, si rivelarono completamente sbagliati, e la volta della chiesa crollò rendendo necessaria la ricostruzione di tutto il corpo (ibid.).

A seguito di questa ricostruzione, al termine del XVII secolo la cattedrale raggiunse un aspetto molto vicino a quello odierno e le uniche modifiche successive furono l'aumento della lunghezza della navata principale, l'abbattimento del portico costruito nel '400 sull'attuale via Indipendenza, e la nuova facciata.

La basilica di Santa Maria Maggiore venne costruita attorno al IV-V secolo d.C., con una classica struttura ravennate-bizantina (Dalla Tuata, 2005).

Aveva originariamente tre navate con orientamento E-O

ed entrata verso Est e accanto ad essa scorreva il torrente Aposa, oggi sotterraneo (Poli, 2000).

Elevata a basilica dopo i lavori di ristrutturazione del 1070, la chiesa rimase essenzialmente immutata sino al XV secolo, quando venne allungata e dotata di nuove cappelle.

Successivamente fu oggetto di diverse ristrutturazioni, la più importante delle quali in epoca barocca, che ne vide un'inversione di orientamento, per portare l'ingresso direttamente sulla via Galliera.

Da allora, l'unica modifica sostanziale fu l'allungamento del presbiterio del 1759 (Rivani et al., 1966).

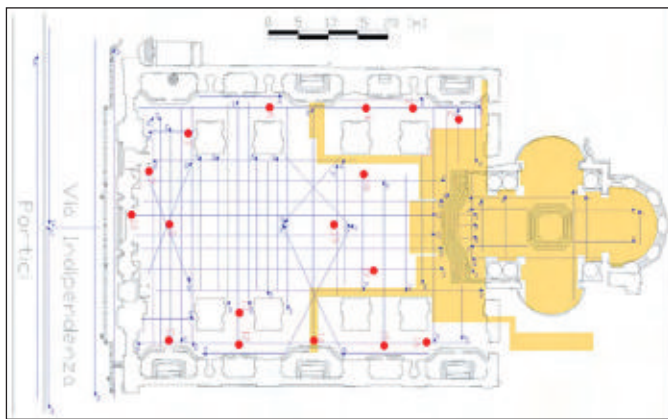


Fig 1 - Pianta della cattedrale di San Pietro con sovrainpressi cripta, aree di scavo e cunicoli. Le frecce blu indicano le misure GPR, i pallini rossi le misure di sismica passiva.

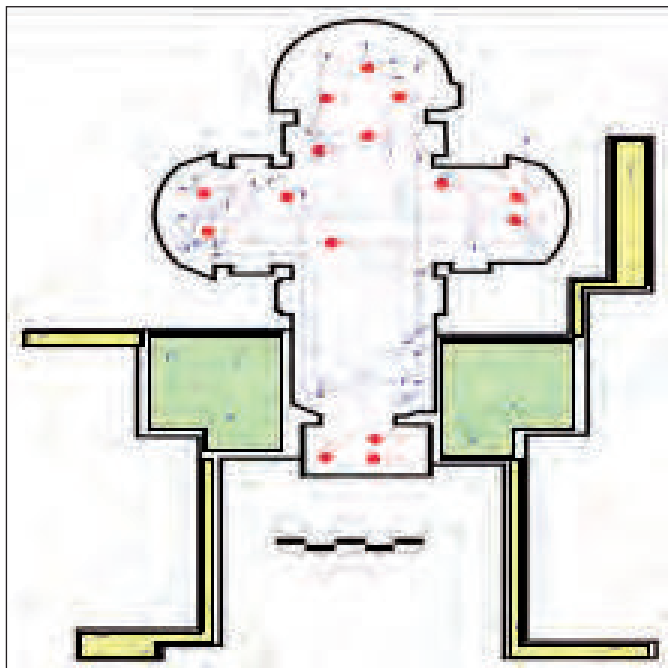


Fig 2 - Pianta della cripta con adiacenti le due aree di scavo (verde) e i cunicoli (giallo). Le frecce blu indicano le misure GPR, i pallini rossi le misure di sismica passiva.

## 5. LE MISURE

All'interno di San Pietro (sia all'interno della chiesa, sia in cripta) sono state effettuate 34 registrazioni di rumore sismico e 116 misure GPR (6 delle quali di fronte alla facciata della chiesa e sul piano di Via Indipendenza). L'ubicazione delle misure è riportata in fig. 1 e 2.

A Santa Maria Maggiore sono state effettuate 10 misure di sismica passiva e 63 misure GPR, alcune all'interno e le altre all'esterno della chiesa (vedi fig. 3).

Sia a San Pietro sia a Santa Maria Maggiore si è stimato il valore della costante dielettrica  $\epsilon$  tramite il confronto del profilo GPR con la profondità di riflettori noti, in punti in cui era disponibile una misura diretta.

Il valore di  $\epsilon$ , è risultato pari a 5 nel primo sottosuolo di San Pietro e pari a 4 in quello di Santa Maria Maggiore. Le misure GPR effettuate nella cripta di San Pietro hanno evidenziato la presenza di un riflettore profondo circa 0,9 m (13-14 ns).

Le misure all'interno dei cunicoli e delle aree di scavo (si veda figura 2) si sono rivelate di difficile interpretazione a causa di forti interferenze dovute molto probabilmente alla presenza dell'impianto elettrico.

Le misure di maggiore rilievo sono quelle effettuate sul piano della cattedrale: quelle sul piano dell'altare (anche qui in parte influenzate dalle interferenze, forse dell'impianto elettrico che alimenta i faretto sul soffitto della cripta) identificano la presenza (ovviamente nota) della cripta sottostante, il cui soffitto e pavimento generano riflessioni rispettivamente a 10 e 40 ns in media (fig. 4).

All'interno dell'area della navata maggiore è evidente la presenza di un riflettore discontinuo e irregolare ad una profondità di circa 1.4 m (21 ns; fig. 5).

Inoltre, nella figura 6 (una delle misure effettuate all'interno della navata maggiore) è possibile notare un'iperbole di ampiezza di circa 2 metri la cui sommità ha profondità di circa 1 metro (circa 16 ns).

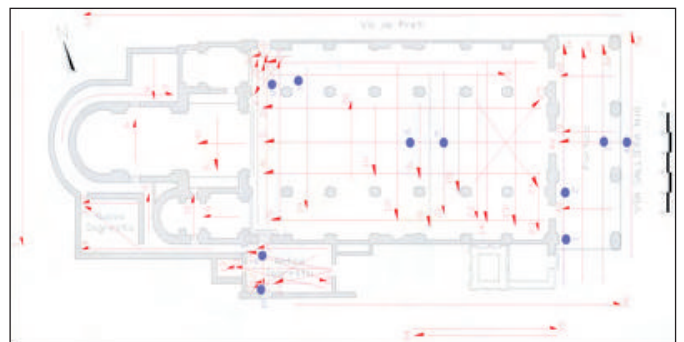


Fig 3 - Pianta di Santa Maria Maggiore; le frecce rosse indicano le misure GPR mentre i puntini blu le misure di sismica passiva.



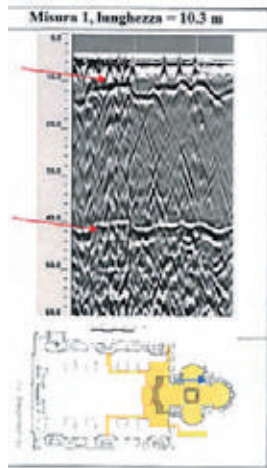


Fig. 4 - San Pietro. Misura effettuata sul piano dell'altare. Si notino i riflettori che identificano il soffitto e il pavimento della cripta.

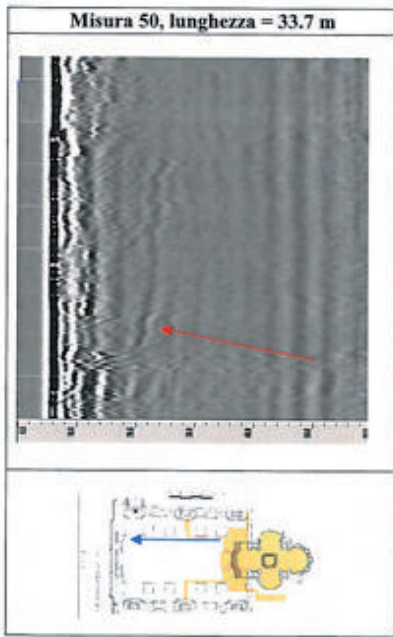


Fig. 5 - San Pietro. Parte del riflettore individuato a circa 1.4 m di profondità (21 ns) all'interno dell'area della navata maggiore.

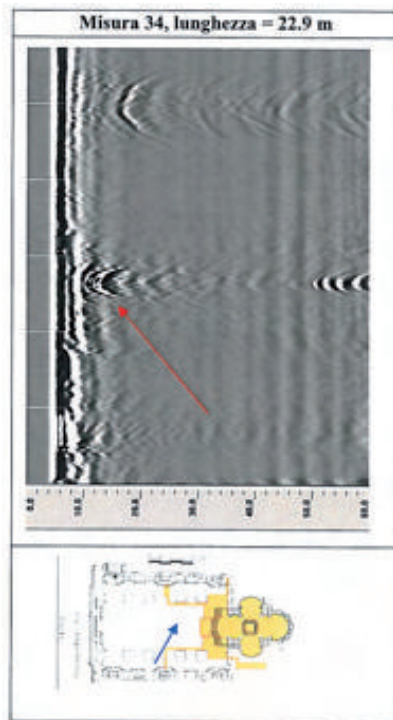


Fig. 6 - San Pietro. Si notino le due iperboli di riflessione: la prima dovuta all'attraversamento in maniera trasversale del cunicolo (freccia rossa); la seconda ad un vuoto (probabilmente una sepoltura) individuato al di sotto del piano della chiesa (cerchio rosso).

Nella stessa figura si notino le iperboli di riflessione prodotte da uno dei cunicoli sotterranei attraversato trasversalmente producendo. Lo stesso cunicolo percorso lungo tutto la sua lunghezza appare invece come un riflettore sub-orizzontale (fig. 7).

Lungo i fianchi della cattedrale lo strumento rileva la pre-

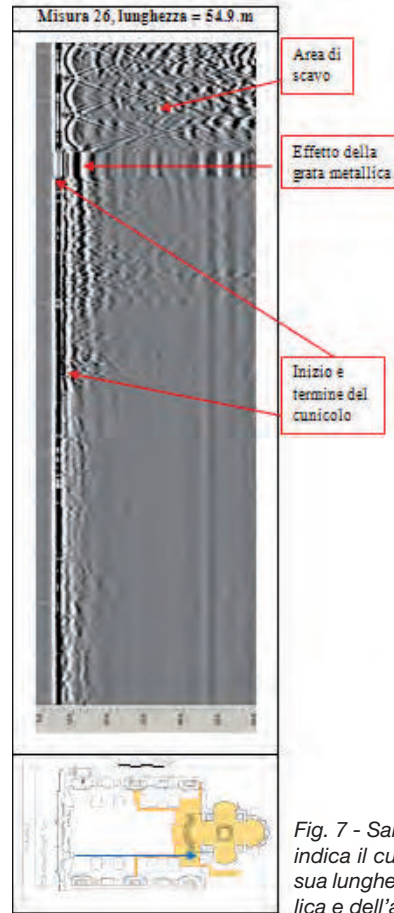


Fig. 7 - San Pietro. Si noti il riflettore che indica il cunicolo percorso lungo tutta la sua lunghezza; l'effetto della grata metallica e dell'area di scavo.

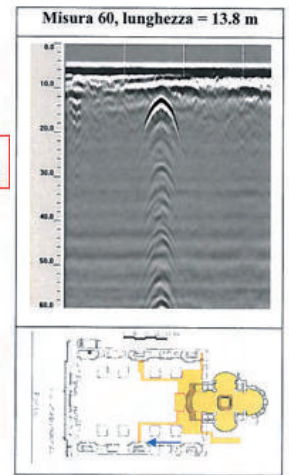


Fig. 8 - San Pietro. Iperbole di riflessione dovuta alla presenza di una tomba (elemento già noto) posta in una delle cappelle laterali della chiesa.

**Nota:** Per ogni misura viene riportata l'ubicazione in pianta (freccia blu per San Pietro, rossa per Santa Maria Maggiore). Nelle immagini GPR viene fornita la lunghezza della misura [m] e il tempo di andata e ritorno dell'onda [ns] sull'asse delle ordinate.

senza (anch'essa già nota) di tombe, visualizzate come iperboli di riflessione (fig. 8). All'esterno, sul piano di Via Indipendenza (fig. 9), sono stati rilevati due riflettori subparalleli al piano stradale, il primo ad una profondità variabile fra 0.95 e 1.35 m (14-20 ns), il secondo a 1.45-2.00 metri (22-30 ns).

Le misure di Sismica Passiva non hanno dato risultati di facile interpretazione a causa della presenza della pavimentazione più rigida rispetto allo strato sottostante, che porta ad una attenuazione delle componenti orizzontali e, di conseguenza, ad un rapporto H/V inferiore a 1, mascherando le autofrequenze relative agli strati più profondi (fig. 10; cf. Castellaro e Mulargia, 2009b).

Le misure GPR effettuate a Santa Maria Maggiore hanno dato risultati differenti in funzione delle diverse zone della chiesa.

Al di sotto dell'antica sagrestia, situata accanto al fianco

meridionale della chiesa, è presente una cantina; le misure mettono in chiara evidenza un vuoto a 12 ns, corrispondenti a circa un metro di profondità (fig. 11).

Nelle misure effettuate al di fuori della chiesa, ed in particolare in quelle effettuate nel portico, sono ben visibili due riflettori, uno a 24-26 ns ed uno a 40 ns (fig. 12). Quello più superficiale si trova ad profondità di circa 2.5 metri, stessa profondità a cui si trova il pavimento della cantina sotto la sagrestia che, per evidenze archeologiche, si ipotizza essere parte della pavimentazione della chiesa originaria, costruita nel IV-V secolo.

Anche gli altri riflettori individuati avallano questa ipotesi

mettendo in evidenza una possibile continuità di questa pavimentazione.

All'interno della chiesa i risultati ottenuti sono totalmente differenti, con la mancanza (si veda la figura 13) di qualsiasi riflettore.

In pratica, all'interno della chiesa il GPR sembra perdere il suo potere penetrativo, con l'unica eccezione delle misure nella parte terminale della navata minore settentrionale, dove si ha chiara evidenza di una inclusione di materiale a diversa costante dielettrica (fig. 14), forse una nicchia o un'antica sepoltura ricolmata.

Quest'ultima inclusione è ben evidente anche nelle misure di Sismica Passiva, che mostrano nella figura 15 la presenza di un'inclusione di materiale a maggiore rigidità.

La ripetizione delle misure nel periodo estivo, dopo un periodo di due mesi di clima caldo e secco, non ha in alcun modo modificato le immagini GPR, portando alla conclusione che la "cecità" del GPR all'interno della chiesa non è legata al grado di umidità del sottosuolo, la cui stagionalità è ben nota.

## 6. DISCUSSIONE ED INTERPRETAZIONE DELLE MISURE

Gli elementi di maggior interesse che emergono dallo studio della cattedrale di San Pietro sono (fig.16):

- Un riflettore presente sotto quasi tutta la navata maggiore, alla profondità di circa 1.40 metri, la stessa della base di uno dei pilastri presente all'interno di una delle aree di scavo, il quale apparteneva alla cattedrale romanica; poichè quest'area coincide con buona approssimazione con l'area della struttura romanica, appare ipotizzabile identificare questo riflettore con il pavimento della cattedrale romanica.

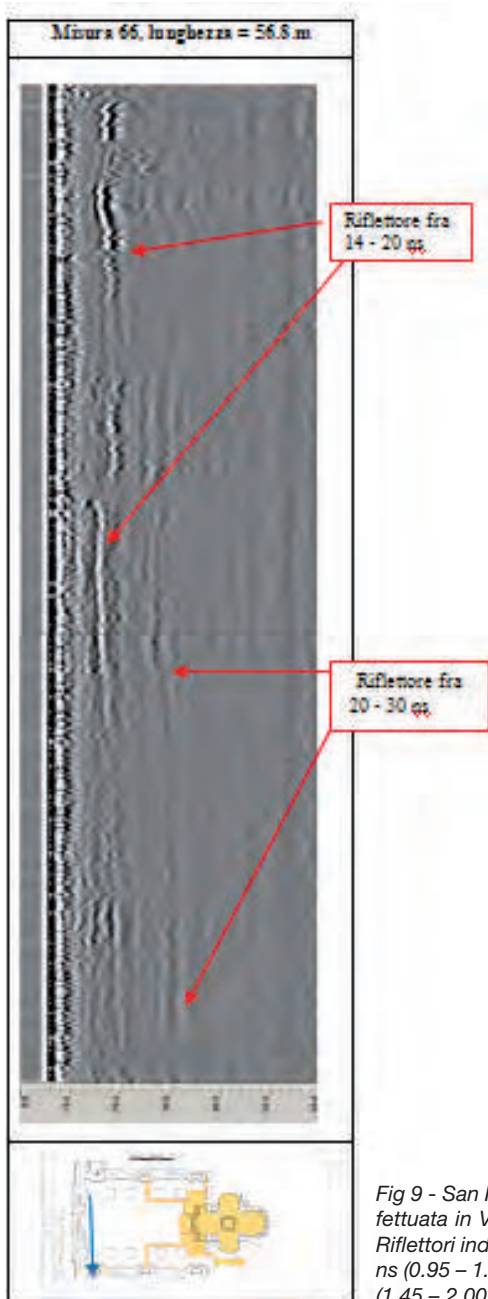


Fig 9 - San Pietro. Misura effettuata in Via Indipendenza. Riflettori individuati tra 14-20 ns (0.95 - 1.35 m) e 20-30 ns (1.45 - 2.00 m).

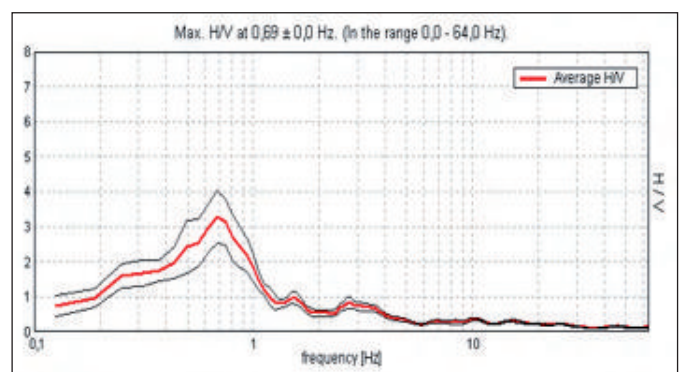


Fig. 10 - Esempio di misura di sismica passiva effettuata a San Pietro. Si noti l'inversione di velocità che copre le frequenze fino a ca. 1.2 Hz. L'inversione è presente anche in tutte le altre misure.



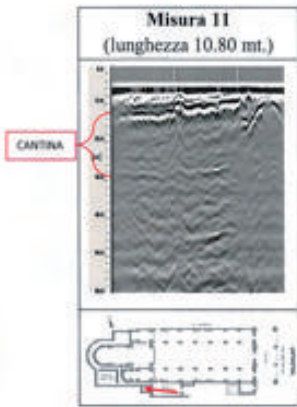


Fig. 11 - Misura effettuata nell'antica sagrestia. Si notino i riflettori del soffitto e del pavimento della cantina;

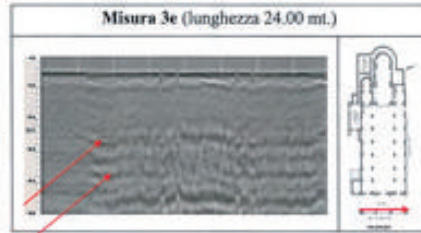


Fig. 12 - Si notino i riflettori a 24 - 26 ns e a ca. 40 ns.

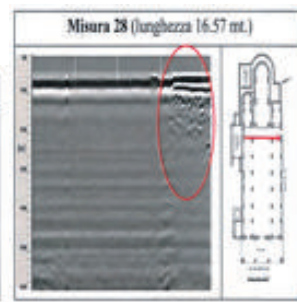


Fig. 13 - All'interno e solo all'interno della chiesa non viene visualizzato alcun tipo di riflettore.

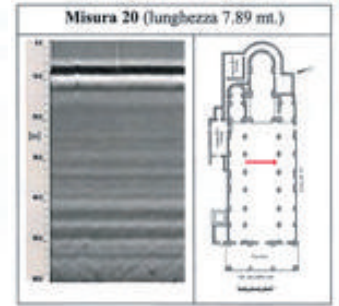


Fig. 14 - Nella parte terminale della navata minore settentrionale è presente una nicchia, un'inclusione, forse un residuo di un'antica sepoltura.

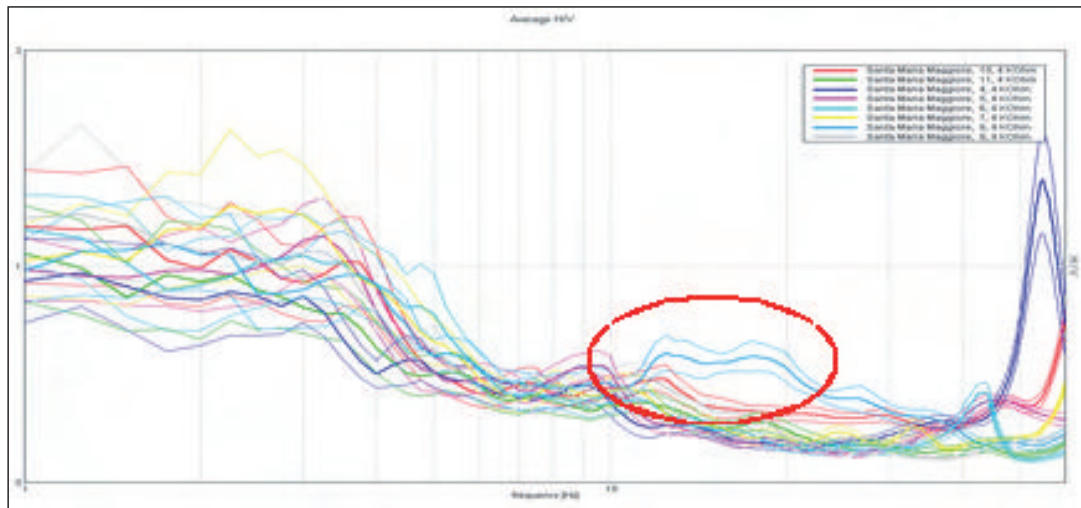


Fig. 15 - Misure di sismica passiva effettuate a Santa Maria Maggiore. In rosso è segnalato il picco dovuto all'inclusione presente nella navata settentrionale rilevata anche dalle misure GPR.

- Un'ampia iperbole di riflessione, che potrebbe rappresentare la presenza di un vuoto ad profondità di circa un metro; è ipotizzabile che si tratti di una sepoltura;
- All'esterno, sul piano di Via Indipendenza, di fronte alla facciata della chiesa e ad una distanza non superiore a 3-4 metri sono stati individuati due riflettori, il primo ad una profondità variabile tra 1 e 1,4 metri (14-20 ns) ed il secondo tra 1,5-2 metri (22-30 ns); appare plausibile interpretare questi riflettori come resti di strade antiche, molto probabilmente risalenti all'Epoca Romana.

I risultati ottenuti nella basilica di Santa Maria Maggiore (fig.17) sono decisamente meno facili da interpretare. Il fatto che all'interno e solo all'interno della chiesa le onde elettromagnetiche perdano del tutto il loro potere

penetrativo indica la presenza di uno strato di materiale conduttivo.

Data la netta delimitazione di questo effetto al solo interno della chiesa e tenendo conto del fatto che l'Aposa ha molte volte allagato Bologna (Poli, 2000), sembra probabile che questo materiale sia il residuo dei limi di inondazione. In pratica, le pareti della chiesa hanno fatto da vasca trattenendo i limi, i quali, depositandosi e solidificandosi, hanno "congelato" le particelle polarizzate in essi contenute, dando luogo ad uno strato conduttivo.

Le pavimentazioni successive sono state quindi edificate al di sopra di questo tappeto di sedimenti polarizzati, che impediscono al segnale GPR di penetrare nel sottosuolo.

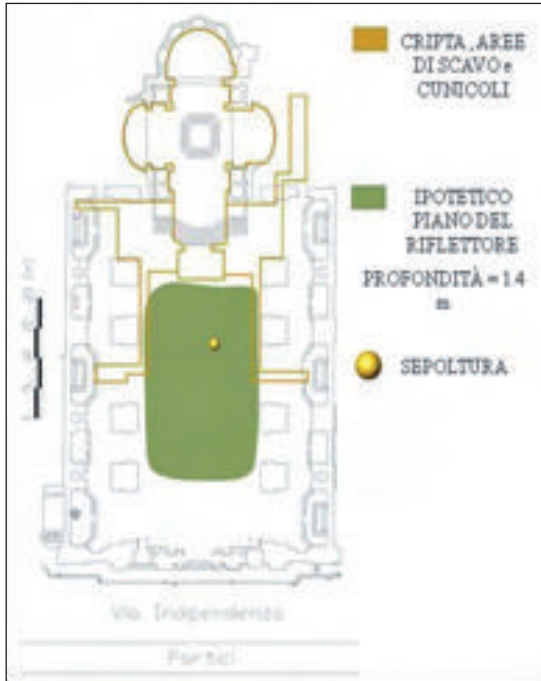


Fig. 16 - Schema riassuntivo degli elementi trovati a San Pietro con legenda.

I dati ottenuti nell'esterno della chiesa, dove questo effetto è assente, sembrano invece confermare tutte le ipotesi sulla sua origine più antica.

## 7. CONCLUSIONI

Sia la tecnica GPR che la Sismica Passiva si sono rivelate preziose nel fornire una mappa del suolo al di sotto delle chiese di San Pietro e Santa Maria Maggiore, fornendo nuovi elementi oggettivi per ricostruire le loro vicissitudini architettoniche.

In particolare, in San Pietro è stato possibile localizzare 1) il pavimento della antica chiesa romanica, 2) una sepoltura non nota e, davanti ad essa nella via Indipendenza, 3) il pavimento antico, probabilmente di epoca romana. Nella navata destra della basilica di Santa Maria Maggiore è invece risultata evidente un'inclusione, probabilmente una sepoltura, nonché, all'esterno sulla via Galliera, una pavimentazione antica forse riconducibile all'epoca romana e forse coeva alla prima edificazione della chiesa nel IV-V secolo.

Sono anche apparsi evidenti alcuni limiti delle tecniche. In particolare, il GPR si è rivelato praticamente "cieco" all'interno di Santa Maria Maggiore, molto probabilmente a causa di uno strato solidificato di limi di esondazione fluviale dell'Aposa, che hanno costituito uno strato

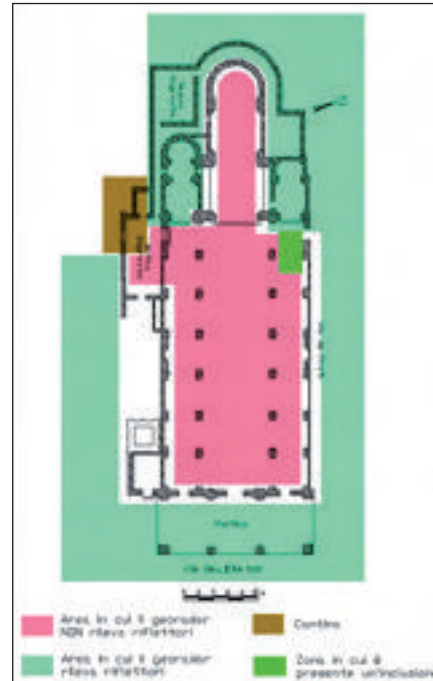


Fig. 17 - Schema riassuntivo degli elementi trovati a Santa Maria Maggiore con legenda.

di materiale conduttivo che impedisce la propagazione delle onde elettromagnetiche.

Allo stesso tempo, la Sismica Passiva si è dimostrata di difficile interpretazione nel caso di stratificazioni a rigidità maggiore sovrastanti strati a rigidità minore, il che si verifica quasi sempre nel caso di pavimentazioni lapidee.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- CASTELLARO S., IMPOSA S., BARONE F., CHIAVETTA F., GRESTA F. e MULARGIA F. (2008): *Georadar and passive seismic survey in the Roman Amphitheatre of Catania (Sicily)*. Journal of Cultural Heritage, pp.1-10.
- CASTELLARO S., MULARGIA F. (2009a): *VS30 Estimates Using Constrained H/V Measurements*. Bull. Seism. Soc. Am., Vol.99, pp. 761-773.
- CASTELLARO S., MULARGIA F. (2009b): *The Effect of Velocity Inversions on H/V*, Pure Appl. Geophys., Vol.166, pp. 567-592.
- DALLA TUATA F. (2005). *Istoria di Bologna*. Vol 1,2,3. Ed. Costa
- FANTI M. (1995): *La Chiesa cattedrale e metropolitana di San Pietro in Bologna: guida a vedere e a comprendere*. Ed Vallecchi.
- GSSI (2003): *TerraSIRch SIR System-3000 User's Manual*. Geophysical Survey System, Inc.
- POLI M. (2000): *Il torrente Aposa*. Ed. Costa.
- RIVANI G., ROVERSI G., FANTI M. (1966): *La Basilica parrocchiale di Santa Maria Maggiore in Bologna*. Tipografia Luigi Parma
- TERRA R. (1997): *La cattedrale di San Pietro a Bologna*. Ed. Cinisello Balsamo.