



**SULLA POSSIBILITÀ DI AUTOMATIZZARE
L'INTERPRETAZIONE DEL SEGNALE GPR
PER IL MONITORAGGIO DELLE
PAVIMENTAZIONI STRADALI**

Andrea Benedetto

Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile - Università di Roma Tre
Via Vito Volterra 60, 00146 Roma
Tel: +39 06.55173316 - Fax: +39.06.55173441
E-mail: benedet@dsic.uniroma3.it

Francesco Benedetto

Dipartimento di Ingegneria Elettronica - Università di Roma Tre
Via della Vasca Navale 84, 00146 Roma
Tel: +39 06.5803664 - Fax: +39.06.55173441
E-mail: benedetto.f@tin.it

SULLA POSSIBILITÀ DI AUTOMATIZZARE L'INTERPRETAZIONE DEL SEGNALE GPR PER IL MONITORAGGIO DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI

ANDREA BENEDETTO - Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile – Roma Tre
FRANCESCO BENEDETTO - Dipartimento di Ingegneria Elettronica - Roma Tre

SOMMARIO

L'esigenza, già da più parti sottolineata, di adottare opportune strategie di programmazione per la gestione del patrimonio viario nazionale, soprattutto alla luce del diffuso degrado strutturale, cui possono conseguire effetti sulla sicurezza e sulla funzionalità dell'esercizio, pone evidenti questioni sotto il profilo della protezione civile. Peraltro le risorse destinate alla manutenzione e riqualificazione dei manufatti in Italia sono tanto irrisorie, che solo un adeguato piano di interventi, finalizzato a prevenire gli effetti disastrosi rilevando ed eliminando le cause dei degradi, può produrre qualche beneficio reale. A questo proposito anche le modalità di controllo hanno una loro intrinseca importanza. Infatti le condizioni di crisi, benché possano anche avere dinamiche lente di sviluppo, in genere manifestano la loro gravità in tempi rapidissimi.

In questo senso numerosi sforzi sono stati dedicati alla messa a punto di tecniche non tradizionali speditive ed affidabili. Il Georadar (Ground Penetrating Radar) rappresenta in tale contesto lo strumento più promettente, al punto che sono divenute usuali le applicazioni in molti paesi del mondo come in Italia.

D'altra parte se le possibilità diagnostiche offerte dal Georadar sono di rilievo, è anche stata messa in evidenza la complessità della fase interpretativa del dato acquisito dallo strumento stesso. In questo senso gran parte dei protocolli d'uso del GPR prevedono l'applicazione di cross-checking, che raramente possono essere automatizzati ed inoltre impongono la supervisione da parte di un esperto nel settore delle pavimentazioni, in grado di valutare, sulla base della propria esperienza, singolarità ed anomalie.

L'affidabilità interpretativa dei software commerciali è limitata al punto che la loro applicazione, consueta in altri settori (p.es. ricerca di sottoservizi), è spesso abbandonata nell'analisi delle pavimentazioni stradali, allorché non sia assistita da personale esperto al di fuori delle procedure automatiche.

Nel presente lavoro si formulano le linee di sviluppo per tecniche efficienti di elaborazione numerica di segnali radar per il rilevamento e monitoraggio dei sottofondi stradali. L'Obiettivo dell'algoritmo è la valutazione del tipo di singolarità rilevata, distinguendo con procedura automatica anomalie puntuali da anomalie diffuse, nonché l'affidabilità della valutazione stessa. La struttura matematica dell'algoritmo prevede l'applicazione di un'analisi a soglie, in grado di rilevare l'ampiezza dei ritardi temporali del segnale riflesso, attraverso un approccio la cui validità già risulta verificata.

ABSTRACT

The wide structural damage of Italian roads network implies consequences for the safety and functionality and sets up critical questions under the point of view of the civil safety. Then suitable programmed policies for road management are needed. Moreover

the financial budgeting for road maintenance and rehabilitation is so limited that only an organic plan, directed to remove the damage causes, can perform some real benefits. The monitoring technologies are strategic. In fact the damage grows usually slowly, but it becomes critical and severe in very short time. With regard to this, some new no traditional advanced, reliable and speedily, technologies have been developed. In this sense the GPR is considered a very promising tool all over the world. Nevertheless it's very difficult to process automatically the collected data without expert in the pavement sector assisting. This paper shows the guide lines for efficient techniques in radar signal processing, for road subgrade surveying and monitoring. The aim of the proposed algorithm is to assess the kind of singularity, considering punctual or widespread anomalies, as well as the validation of the reliability. The mathematical structure of the algorithm requires the application of a threshold analysis through a reliable approach.

1. INTRODUZIONE

L'esigenza, già da più parti sottolineata, di adottare opportune strategie di programmazione per la gestione del patrimonio viario nazionale, soprattutto alla luce del diffuso degrado strutturale, cui possono conseguire effetti sulla sicurezza e sulla funzionalità dell'esercizio, pone evidenti questioni sotto il profilo della protezione civile. I risultati di un recente Progetto di Ricerca di Rilevante Interesse Nazionale (PRIN 97/99 - *La determinazione degli standard di progetto dell'infrastruttura stradale in funzione dell'informazione visuale e delle sollecitazioni psicofisiche indotte dalla strada sull'utente*) ha messo in chiara evidenza come circa il 30% dell'incidentalità su strada sia direttamente imputabile alle condizioni di degrado delle sovrastrutture. Questo dato in primis dà il senso della gravità del problema, quindi impone urgenti interventi di riqualificazione.

Nonostante ciò le risorse destinate alla manutenzione e riqualificazione dei manufatti in Italia sono tanto irrisorie, che solo un adeguato piano di interventi, finalizzato a prevenire gli effetti disastrosi rilevando ed eliminando le cause dei degradi, può produrre qualche beneficio reale. A questo proposito anche le modalità di controllo hanno una loro intrinseca importanza. Infatti le condizioni di crisi, benché possano avere dinamiche lente di sviluppo, in genere manifestano la loro gravità in tempi rapidissimi.

Com'è noto, l'ingegneria stradale dispone di strumenti adeguati per una diagnostica puntuale, questa tuttavia è caratterizzata da tempi e costi che non la rendono di agevole fruizione per le Amministrazioni che gestiscono il patrimonio di viabilità "minore", soprattutto quando l'indagine deve essere ripetuta periodicamente e coinvolge dimensioni di rete di alcune centinaia di chilometri.

Inoltre le tecniche tradizionali consentono un buon livello di analisi degli effetti ma non correlano, se non occasionalmente, l'effetto con le cause possibili, principalmente in ragione del fatto che si basano sull'osservazione esterna o su intrusioni puntuali poco rappresentative di degradi diffusi (carotaggi). I punti di debolezza delle tecniche tradizionali sono in sintesi riconducibili ai seguenti:

- non identificazione delle cause,
- bassa rappresentatività delle analisi,
- limitata affidabilità dell'indagine di campo basata sul confronto visuale,
- possibilità di rilevare esclusivamente gli effetti esterni e "visibili".

2. LA DIAGNOSTICA BASATA SUL GEORADAR

Numerosi sforzi sono stati dedicati alla messa a punto di tecniche non tradizionali speditive ed affidabili, che tendano a superare i limiti sopra accennati. Il Georadar (Ground Penetrating Radar) rappresenta in tale contesto lo strumento più promettente, al punto che sono divenute usuali le applicazioni in molti paesi del mondo [7] come in Italia, recentemente anche per il monitoraggio degli ammaloramenti [4].

Come è ben noto, l'indagine diagnostica condotta con GPR si basa sull'analisi delle differenze di frequenza, fase ed ampiezza tra il segnale elettrico trasmesso e ricevuto da una o più antenne, al fine di risalire alle proprietà elettriche degli strati, dalle quali è possibile infine dedurre, con una definita attendibilità, alcune proprietà fisiche dei mezzi attraversati.

Se le possibilità diagnostiche offerte dal Georadar sono di rilievo [1], è anche stata messa in evidenza la complessità della fase interpretativa del dato acquisito dallo strumento stesso. In questo senso gran parte dei protocolli d'uso del GPR prevedono l'applicazione di procedure di cross-checking, che raramente possono essere automatizzate ed inoltre impongono la supervisione da parte di un esperto nel settore delle pavimentazioni, in grado di valutare sulla base della propria esperienza, singolarità ed anomalie [3].

L'affidabilità interpretativa dei software commerciali è limitata al punto che la loro applicazione, consueta in altri settori (p.es. ricerca di sottoservizi), è spesso abbandonata nell'analisi delle pavimentazioni stradali, allorquando non sia assistita da personale esperto al di fuori delle procedure automatiche.

Tra i maggiori problemi che si incontrano nell'interpretazione di un segnale Georadar c'è la difficoltà di identificare e risolvere echi elettrici provenienti da differenti interfacce tra loro molto vicine [5]. E' questo ad esempio il caso, frequente nelle sovrastrutture stradali, di strati con spessore molto piccolo, dell'ordine di qualche centimetro. In questi casi è quasi impossibile procedere ad una identificazione degli echi, che derivano dalle riflessioni alle interfacce, tramite indagine visiva ed è altrettanto difficile risolverli attraverso l'uso del consueto metodo dei filtri accoppiati. Infatti, correlando il segnale ricevuto o eco di ritorno, con il segnale trasmesso, noto a priori, nell'obiettivo di ottenere dalla cross-correlazione le stime delle ampiezze e dei ritardi temporali delle tracce radar, ne risulta l'impossibilità di risolvere i due segnali aventi una spaziatura temporale inferiore al periodo del segnale stesso [8].

In figura 1 è riportato un esempio schematico in cui il segnale trasmesso h è riflesso due volte a_1h e a_2h da due interfacce caratterizzate da proprietà dielettriche sensibilmente differenti, come si vede l'interferenza tra queste due repliche dà luogo ad un segnale y complesso da cui non è immediato estrarre l'informazione sulla struttura del mezzo attraversato.

Un ulteriore problema è ovviamente connesso al fatto che i materiali costituenti il pacchetto di pavimentazione e sottofondo, con riferimento alle caratteristiche di conducibilità elettrica, risultano molto simili, allorquando si trovino nelle stesse condizioni di umidità. In particolare i valori delle costanti dielettriche relative variano in un campo compreso tra 2 e 9. Al proposito giova rammentare che il valore della costante dielettrica relativa dell'acqua è di un ordine di grandezza superiore (81).

Da ciò deriva un effetto in termini di attenuazione delle ampiezze dei segnali difficilmente rilevabile, soprattutto se confrontato con quanto accade nel caso della ricerca di sottoservizi, perlopiù costituiti da elementi metallici ad elevatissima conducibilità elettrica.

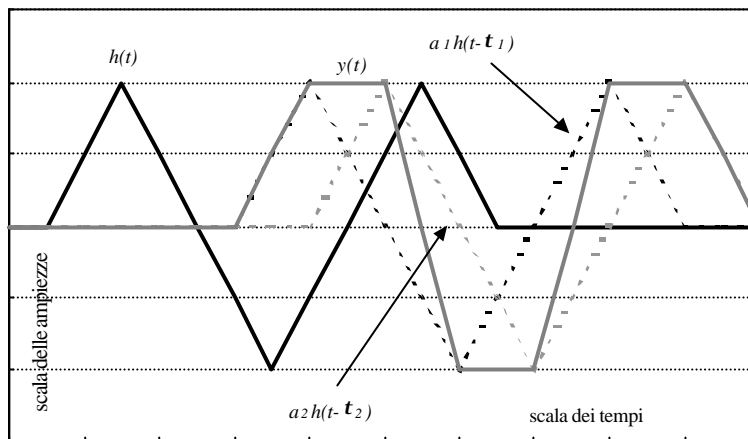


Fig. 1 – Rappresentazione schematica delle difficoltà di risolvere spessori minimi

3. DISCUSSIONE SUI PRINCIPI PER L'ANALISI DEL SEGNALE RADAR

Come precedentemente accennato e peraltro ben noto, l'indagine diagnostica condotta con GPR si basa sull'analisi delle differenze tra la frequenza, la fase e l'ampiezza del segnale elettrico trasmesso e di quello ricevuto, al fine di risalire alle proprietà elettriche del mezzo attraversato, dalle quali è possibile dedurre con una definita attendibilità alcune proprietà fisiche. L'indagine con GPR è una tecnica geofisica in cui un impulso elettromagnetico viene trasmesso nel terreno e le sue riflessioni sono poi ricevute da una o più antenne. L'impulso radar è trasmesso, riflesso e diffratto nel sottosuolo in funzione delle anomalie di tipo elettrico presenti. I parametri che più interessano sono rappresentati dai ritardi temporali delle riflessioni, dalle modulazioni di frequenza e dai guadagni delle singole tracce radar utilizzate, ovvero dai fenomeni di attenuazione delle ampiezze. Infatti è possibile da essi risalire ad una stima della costante dielettrica dei mezzi analizzati: promettenti risultati ottenuti attraverso analisi sperimentali mostrano buoni livelli di correlazione tra la costante dielettrica e alcune caratteristiche dei mezzi considerati quali anche il contenuto d'acqua e la densità [6].

Da un punto di vista strettamente analitico, il segnale ricevuto $y(t)$ può essere espresso, nel dominio temporale, come una somma di più repliche del segnale trasmesso, opportunamente scalate ed amplificate, più un contributo dovuto al rumore. In formule si ottiene la seguente forma generale [8]:

$$y(t) = \sum_{i=1}^L a_i h(t - \mathbf{t}_i) + e(t)$$

dove $h(t)$ rappresenta il segnale trasmesso e noto, $y(t)$ è come detto l'eco di ritorno costituito da L repliche di $h(t)$ con differenti ampiezze $\{a_i\}_{i=1,L}$ e ritardi temporali $\{\mathbf{t}_i\}_{i=1,L}$ ed infine, $e(t)$, rappresenta il casuale contributo di rumore additivo.

Il segnale ricevuto può essere riscritto, in forma campionata, come:

$$y(nT_s) = \sum_{i=1}^L a_i h(nT_s - \mathbf{t}_i) + e(nT_s)$$

con T_s periodo di campionamento e $n = 0, 1, \dots, N-1$.

Nel dominio di Fourier il modello del segnale ricevuto risulta composto dalla somma di molteplici funzioni esponenziali complesse, ciascuna con un suo peso, più il contributo dovuto al rumore. Denotando con $Y(k)$, $H(k)$ ed $E(k)$ la trasformata discreta di Fourier rispettivamente di $y(nT_s)$, $h(nT_s)$ ed $e(nT_s)$, si può scrivere:

$$Y(k) = H(k) \sum_{i=1}^L a_i e^{jw_i k} + E(k)$$

dove $w_i = -\frac{2\pi t_i}{NT_s}$ e $k = -N/2, -N/2+1, \dots, N/2-1$.

Tale espressione è funzionale all'applicazione di una successione di filtri digitali nel campo delle frequenze, finalizzati da una parte all'eliminazione di rumori connessi a riflessioni indesiderate e dall'altra all'estrazione delle informazioni relative alla fase e frequenza di ciascuna replica. Infatti le informazioni sulla fase della replica consentono le stime dei ritardi e quindi degli spessori degli strati, mentre quelle sulla frequenza della replica, conseguenti a differenti situazioni di scattering, consentono valutazioni sulla forma delle interfacce (variazione di scattering cross section).

Inoltre un elemento determinante, dipendente dalla frequenza del segnale, è costituito dall'analisi dell'attenuazione delle ampiezze delle repliche: essa, come già accennato, è direttamente correlata alle caratteristiche dielettriche dei mezzi attraversati.

In sintesi l'elaborazione numerica del segnale prevede in generale i seguenti standard di riferimento:

- eliminazione del gap di aria compreso tra le antenne e la prima interfaccia aria-suolo, mediante opportuna traslazione o shifting del segnale in modo da allineare la scala delle profondità della mappa radar corrente rispetto alla posizione del piano di superficie investigato;
- riduzione delle componenti di rumore indesiderato ed eliminazione delle riflessioni spurie mediante applicazione di filtri passa-banda, passa-alto e passa-basso;
- riduzione dell'effetto di attenuazione mediante applicazione di algoritmi di compensazione, basati sull'utilizzo di specifiche funzioni governate da una legge con andamento inverso rispetto al fenomeno attenuativo.

4. SCHEMA NUMERICO DI UN ALGORITMO EFFICIENTE PER L'INTERPRETAZIONE AUTOMATICA DEL SEGNALE GPR

Al fine di risolvere le ambiguità connesse all'interpretazione automatica del segnale radar, con specifico riferimento all'individuazione degli ammaloramenti delle pavimentazioni stradali, è risultato utile riferire le classi di ammaloramenti indicate dai principali cataloghi a tre categorie. Tali categorie sono funzionali alle macroscopiche differenze che manifesta il segnale elettrico in termini di ritardo e sfasamento.

Rimandando al seguito la discussione di tali aspetti strettamente analitici, si riporta a seguire lo spettro di tali categorie, individuando per ciascuna di esse, gli ammaloramenti che ad essa appartengono. Ovviamente, riferendoci ai cataloghi, restano esclusi da tale classificazione tutti quegli ammaloramenti in cui la diagnostica GPR non è efficace, tra cui: la lucidatura degli inerti, le fessurazioni longitudinali e le fessurazioni dei giunti.

La prima categoria è riferita alla presenza di un elemento di discontinuità all'interno di uno strato omogeneo di materiale, come ad esempio un vuoto o una lente d'acqua racchiusa nel sottofondo. La possibilità di evidenziare tale situazione, attraverso un'indagine con GPR, sussiste esclusivamente se la differenza tra le proprietà dielettriche del materiale esterno e di quello chiuso nella discontinuità sono sufficientemente differenti da risultare superiori alle soglie di risoluzione dello strumento. Tale condizione è senz'altro assicurata nel caso di presenza di acqua in ragione dell'elevata costante dielettrica. Tali considerazioni valgono non solo in questo caso ma evidentemente anche per le due ulteriori categorie. Appartengono alla prima categoria le fessurazioni trasversali, ai bordi, a blocchi e ramificate, conseguenti ad esempio:

- durante l'esecuzione dei lavori, alla cattiva ripresa degli strati, alla presenza di umidità alla stesa, alle irregolarità del piano di posa a costipamento non uniforme, alla cattiva esecuzione dei drenaggi, all'erronea profilatura (ristagni),
- con riferimento alle cause esterne, ad un cedimento localizzato dei sottofondi, a rigonfiamenti per inclusioni argillose, ad inquinamenti argillosi di strati portanti, ad azione del gelo nei sottofondi, a sviluppo di apparati radicali.

La seconda categoria riguarda le deformazioni diffuse della giacitura orizzontale all'interfaccia tra due strati, che definiremo nel seguito come discontinuità tra strati di ampia lunghezza d'onda. Appartengono a tale categoria i seguenti ammaloramenti definiti dai cataloghi: le ormaie, le ondulazioni, le depressioni e i cedimenti nonché le fessurazioni, ove siano accompagnate da una deformazione della giacitura. Le cause prevalenti sono riferibili, in fase di progetto al sottodimensionamento del pacchetto, al sottodimensionamento dei singoli strati e alla non idonea ripartizione degli spessori, mentre, in fase di esecuzione lavori, alla realizzazione di spessori non omogenei.

La terza categoria riguarda le singolarità localizzate e concentrate tra due strati, come ad esempio la risalita localizzata di acqua o materiale fino dal sottofondo. Tali situazioni verranno definite nel seguito come discontinuità tra strati di breve lunghezza d'onda. Appartengono a tale categoria i seguenti ammaloramenti definiti dai cataloghi: la pelatura, le fessurazioni e la risalita d'acqua. Anche in questi casi le cause prevalenti sono riferibili a errori di progetto (sottodimensionamento di singoli strati) e cause esterne (cedimenti localizzati dei sottofondi).

Per una trattazione organica delle correlazioni tra ammaloramento e causa prevalente si rinvia alla bibliografia citata [1]. In questa sede si intende piuttosto approfondire le potenzialità del GPR e la struttura degli algoritmi per l'elaborazione del segnale al fine di identificare l'appartenenza di una singolarità rilevata ad una delle tre categorie descritte.

In quest'ottica si descrivono a seguire i capisaldi della procedura analitica di analisi del segnale elettrico. Il caso più complesso, poiché implicitamente foriero di un elevato livello di ambiguità interpretativa, è quello delle discontinuità tra strati e della distinzione automatica tra discontinuità di breve ed ampia lunghezza d'onda.

La scansione effettuata con GPR prevede la traslazione dello strumento sulla piattaforma stradale e l'invio di impulsi elettrici che conseguentemente vengono registrati alle antenne con intervalli temporali (o spaziali) costanti. Pertanto una scansione è caratterizzata da un insieme di registrazioni digitali rappresentative dei caratteri in profondità lungo la linea di movimento del GPR. Nel seguito si indicherà con pedice il campionamento lungo la direzione di traslazione dello strumento e con

apice il campionamento lungo la verticale. Con riferimento ai ritardi temporali, si effettua dapprima un'analisi tra la media dei ritardi ($\langle \mathbf{t}_i \rangle$) indotti dall'interfaccia continua di uno specifico strato (i), ed il generico ritardo temporale (\mathbf{t}_i^j) di una traccia radar (j) che si riferisce al medesimo strato (i). Se la differenza tra i suddetti parametri risulta minore di un valore di soglia (\mathbf{d}), noto a priori e dipendente dalle caratteristiche fisico-meccaniche del mezzo analizzato, è lecito supporre che lo strato segua, nel suo andamento, un profilo orizzontale.

Nel caso opposto, cioè quando la differenza sopra citata risulta maggiore del valore limite di soglia adottato nello specifico caso in esame, l'analisi si riconduce alla classificazione del tipo di anomalia riscontrata durante la scansione della tratta stradale, in formule:

$$\begin{aligned} \|\langle \mathbf{t}_i \rangle - \mathbf{t}_i^j\| < \mathbf{d} & \quad \text{strato orizzontale} \\ \|\langle \mathbf{t}_i \rangle - \mathbf{t}_i^j\| > \mathbf{d} & \quad \text{strato con anomalia} \end{aligned}$$

Il ritardo temporale di una generica traccia radar può essere espresso in maniera ricorsiva come la somma del ritardo temporale della traccia precedente più un certo errore:

$$\mathbf{t}_i^{(j)} = \mathbf{t}_i^{(j-1)} + e$$

E' quindi possibile operare una nuova analisi a soglie applicata proprio a quest'ultima variabile e appena introdotta. In termini matematici e con riferimento alle categorie di ammaloramento sopra descritte è possibile scrivere:

$$\begin{aligned} \|e\| > \mathbf{I}^* & \quad \text{discontinuità tra strati di breve lunghezza d'onda} \\ \|e\| < \mathbf{I}^* & \quad \text{discontinuità tra strati di ampia lunghezza d'onda} \end{aligned}$$

avendo indicato con \mathbf{I}^* il valore di soglia.

In altre parole, se la differenza tra il ritardo temporale di una traccia e quello della successiva risulta maggiore di un valore limite allora l'anomalia riscontrata può essere ricondotta ad una discontinuità tra strati di breve lunghezza d'onda. Altrimenti, nel caso in cui il valore di soglia sia rispettato, l'anomalia può essere schematizzata da una diffusa depressione (o sollevamento) degli strati sottostanti quello analizzato. Ciò è rappresentativo del fatto che una variazione brusca del ritardo temporale corrisponde ad una rottura netta della continuità dello strato, viceversa una variazione di modesta ampiezza manifesta i caratteri di una ondulazione regolare e continua della giacitura di interfaccia.

Il caso della discontinuità inclusa in uno strato omogeneo è di più semplice risoluzione, poiché determina una anomalia singola ed identificabile nel segnale, facilmente rilevabile attraverso un'analisi di frequenza.

In figura 2 si riporta un diagramma rappresentativo delle fasi di processo del segnale acquisito dallo strumento. Nell'ultima parte dello schema è esemplificato il metodo di diagnosi dello specifico ammaloramento sulla base dell'algoritmo proposto. Le fasi precedenti attengono alle usuali procedure di analisi del segnale, finalizzate all'eliminazione del rumore e all'eventuale traslazione delle riflessioni, per eliminare tracce non significative.

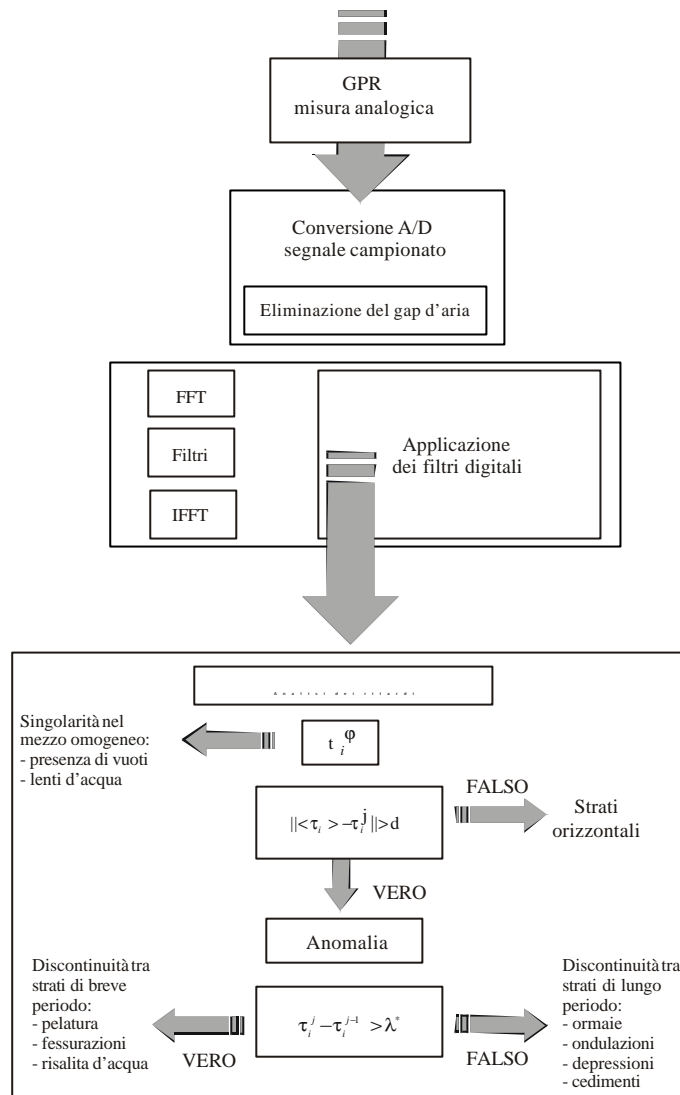


Fig. 2 – Diagramma di flusso del processo di analisi del segnale radar

5. APPLICAZIONE SPERIMENTALE

Al fine di verificare la consistenza dell'impostazione teorica, su cui si basa l'algoritmo per l'accertamento delle singolarità nelle pavimentazioni stradali e per analizzare le potenzialità di efficienza ed efficacia dell'algoritmo stesso è stata eseguita una campagna di analisi di laboratorio presso il Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile dell'Università di Roma Tre.

L'apparecchiatura sperimentale è costituita da una cassaforma, elettricamente schermata, di dimensioni pari a 1 m di lunghezza, 0,5 m di larghezza e 0,7 m di profondità. Sulla cassaforma sono disposte due rotaie sulle quali scorre il carrello che contiene le antenne del GPR. Nella cassaforma è depositato il campione per le misure.

Il Georadar utilizzato è configurato con due antenne, rispettivamente a 600 Mhz e 1,6 GHz. Questo sistema utilizza quattro canali, due bistatici (trasmette la 600 MHz e riceve la 1,6 GHz o trasmette la 1,6 GHz e riceve la 600 MHz) e due monostatici (in cui trasmette e riceve la medesima antenna). In laboratorio si è utilizzato un passo di campionamento pari a 2 cm in orizzontale.

In questa prima fase della ricerca i campioni inseriti nella cassaforma sono costituiti da un doppio strato realizzato da un fondo di pozzolana di circa 15 cm, cui è sovrapposto uno strato di sabbia di circa 15 cm. I materiali, la cui granulometria è riportata in figura 3, sono asciutti e non costipati. Il prosieguo della ricerca prevede lo studio sperimentale in differenti condizioni di umidità e costipamento, finalizzato a correlare tali parametri geotecnici ai caratteri elettrici della risposta radar.

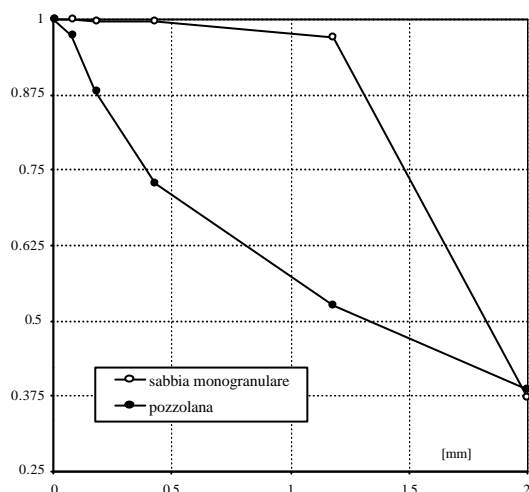


Fig. 3 – Curve granulometriche dei materiali usati in laboratorio



Fig. 4 – L'apparecchiatura di laboratorio

Sono state simulate tre situazioni corrispondenti alle tre categorie proposte per catalogare gli ammaloramenti e differientemente distinguibili con GPR.

Per quanto riguarda l'accertamento di discontinuità all'interno di uno strato omogeneo è stato affogato nello strato di sabbia ed in quello di pozzolana un elemento cilindrico con pareti plastiche, una volta riempito d'acqua e una volta vuoto. Il diametro di questo elemento è di 4 cm.

Per l'accertamento di discontinuità tra strati di ampia lunghezza d'onda sono state realizzate delle ondulazioni sulla superficie di interfaccia tra aria e sabbia e tra sabbia e pozzolana. La lunghezza d'onda di tali oscillazione è dell'ordine dei 20 cm.

Infine per l'accertamento di discontinuità tra strati di breve lunghezza d'onda è stato inserito, in corrispondenza dei due strati, un elemento cilindrico di differenti materiali (plastiche e metalli). Il diametro dell'elemento è compreso tra 4 e 10 cm. L'effetto che si ottiene, in termini di risposta radar, di fatto si configura come il sollevamento localizzato di un'interfaccia con conseguente effetto sulla fase e la frequenza del segnale riflesso.

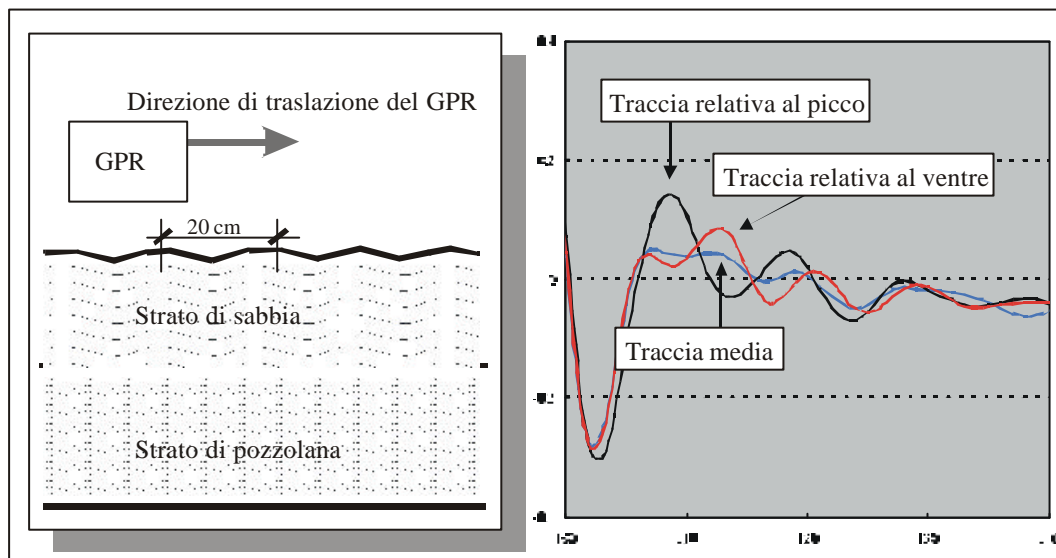


Fig. 5 – Tracce radar relative a ondulazioni di interfaccia di lungo periodo

In figura 5 è riportato il risultato dell'indagine radar di laboratorio per la verifica di ondulazioni di lungo periodo tra strati, come schematicamente illustrato nello schema grafico di sinistra. E' immediato constatare lo sfasamento tra il segnale relativo ad una verticale corrispondente ad un picco sulla superficie di sabbia e una verticale corrispondente ad un ventre. La traccia media, per evidente interferenza distruttiva, non dà conto delle ondulazioni e pertanto non consente da sola di diagnosticare l'anomalia diffusa.

In figura 6 è riportato il risultato dell'indagine radar di laboratorio per la verifica di ondulazioni di breve periodo in corrispondenza dell'interfaccia tra strati, come schematicamente illustrato nello schema grafico di sinistra. E' immediato constatare come i segnali in corrispondenza della singolarità, evidenziati nel grafico rispetto agli altri, siano modulati in frequenza per effetto della presenza dell'anomalia.

In figura 7 è riportato il risultato dell'indagine radar di laboratorio per la verifica di anomalie all'interno di uno strato omogeneo, come schematicamente illustrato nello

schema grafico di sinistra. E' immediato constatare come il segnale presenti due picchi conseguenti alle due interfacce della singolarità inclusa nello strato omogeneo.

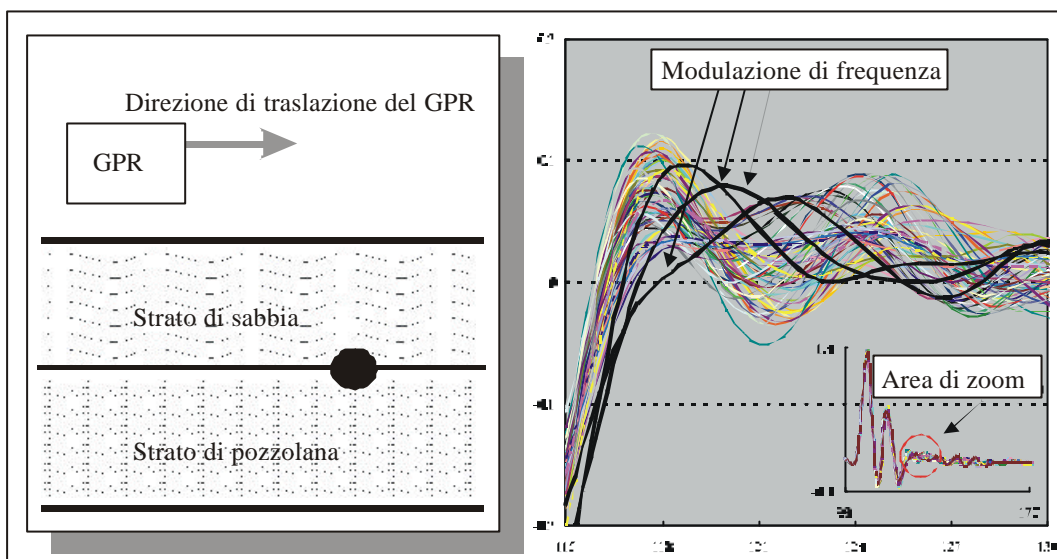


Fig. 6 – Tracce radar relative a singolarità all'interfaccia (breve periodo)

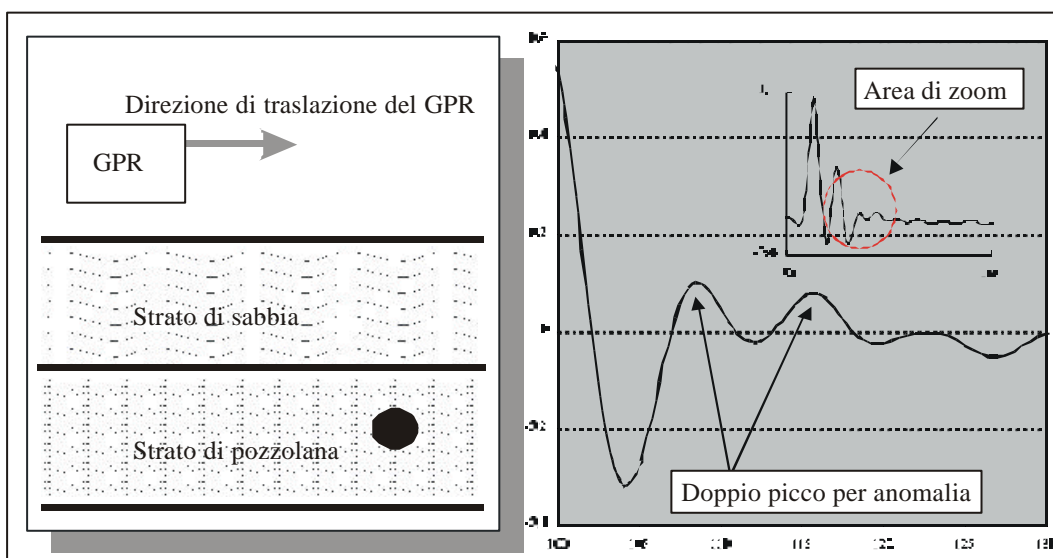


Fig. 7 – Traccia radar in corrispondenza di anomalia in strato omogeneo

Assai complessa è la questione dell'affidabilità del metodo, che di fatto attiene all'identificazione delle soglie $de I^*$. A tal proposito è opportuno distinguere i due casi poiché il primo riguarda l'attendibilità nell'individuazione dell'anomalia e il secondo la caratterizzazione dell'anomalia stessa. E' ovvio che minori sono i valori assunti per le soglie e crescente è il valore dell'affidabilità di una diagnosi di presenza di singolarità, d'altra parte al diminuire della soglia diminuisce la capacità dell'algoritmo di distinguere l'esistenza di una condizione di degrado. La soluzione di questo problema va individuata in una preliminare fase di calibrazione da effettuare in laboratorio e in

scala reale. A tal proposito è in corso una campagna di misure finalizzata all'ottimizzazione delle procedure elettroniche.

6. CONCLUSIONI

La ricerca condotta, oltre a meglio definire il dominio teorico della diagnostica con Georadar sulle sovrastrutture stradali e a correlare nel dettaglio alcuni caratteri rilevabili nel segnale elettrico riflesso e specifiche categorie di ammaloramenti, ha dimostrato, su base sperimentale, la consistenza e validità di nuove ipotesi di lavoro, utili per verificare univocamente le fasi del monitoraggio, anche attraverso l'applicazione di procedure automatiche. La messa a punto di un sistema di rilevazione in configurazione operativa, basato su un algoritmo i cui principi generali sono riconducibili ad un'analisi a soglie, costituisce una promettente frontiera nel campo delle tecnologie avanzate applicate alla valutazione dello stato delle sovrastrutture stradali e all'identificazione delle prevalenti cause di degrado. I caratteri di affidabilità del metodo, la sua speditività, la non intrusività, la possibilità di indagare anche situazioni non rilevabili da analisi visiva e la possibilità di individuare lo spettro delle cause prevalenti, rappresentano i punti di forza di questa tecnica, che per contro necessita ancora di approfondite esperienze di ricognizione su scala reale.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Benedetto, A., M.R. De Blasiis (2001), Road pavement diagnosis, *Quarry and Construction*, **6**, 93-111
2. Benedetto, A., F. Benedetto (2001), Optimal algorithm for the Geo Penetrating Radar signals processing in road pavement analysis and monitoring, submitted to the ASCE Conference of Advanced Technology Application in Transportation, Massachusetts
3. Davis, J.L., J.R. Rossiter, D.E. Mesher, C.B. Dawley (1994), Quantitative measurement of pavement structures using radar, in Proceedings of fifth International Conferences on GPR, Kitchener, Ontario, Canada
4. Huston, D., N. Pelczarski, B. Esser (2000), Damage detection in roadways with Ground Penetrating Radar, in Proceedings of eight International Conferences on GPR, Gold Coast, Australia
5. Li, J., Stoica, P. (1996), Efficient mixed-spectrum estimation with applications to target feature extraction, *IEEE transactions on signal processing*, **44(2)**, 281-295
6. Saarenketo, T (1998) Electrical properties of water in clay and silty soils, *Journal of Applied Geophysics*, **40**, 73-88
7. Saarenketo, T., T. Scullion (2000), Road evaluation with ground penetrating radar, *Journal of Applied Geophysics*, **43**, 119-138
8. Wu, R., J. Li, Z.S. Liu (1999), Super resolution time delay estimation via MODE-WRELAX, *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, **35(1)**, 294-307