

*UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA*  
*FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI*



**Corso di Laurea Specialistica in  
Geofisica di Esplorazione ed Applicata**



Anno Accademico 2009/2010

Candidato: Chiara Cocorullo

Laurea triennale in: Fisica

Titolo della tesi

Modelling di dati GPR e analisi di dati sintetici e misure reali per la stima del diametro delle armature nel calcestruzzo.

Relatore: Prof. Luigi Zanzi

Riassunto

Una delle principali applicazioni del Ground Penetrating Radar, nell'ambito delle ispezioni su edifici civili, è l'individuazione delle strutture di rinforzo nel calcestruzzo. La posizione e la profondità di tali rinforzi possono essere misurate in modo abbastanza preciso, mentre la stima delle loro dimensioni presenta delle difficoltà. Il dimensionamento dei rinforzi, però, assume un'importanza notevole, soprattutto in vista di lavori di restauro, che spesso richiedono tecniche non invasive di rilevamento. Poiché alle frequenze normalmente utilizzate per questo tipo di indagini (1-2 GHz), la risoluzione è dell'ordine dei centimetri, ben più grande delle dimensioni dei target, è impossibile risalire alla grandezza dei tondini dalla forma geometrica che essi assumono in una scansione radar opportunamente elaborata.

Recenti studi finalizzati al dimensionamento dei tondini hanno posto l'attenzione sulla Radar Cross Section, che fornisce una stima della potenza reirradiata da un bersaglio illuminato da un'onda elettromagnetica; poiché tale parametro dipende da alcuni fattori geometrici del target, dalle sue caratteristiche elettromagnetiche e da quelle del mezzo in cui l'onda si propaga, dalla frequenza e dalla polarizzazione dell'onda e dall'angolo d'incidenza di questa sul bersaglio, lo si può utilizzare per ottenere informazioni sulla geometria dei target.

Alcune ricerche suggeriscono di acquisire le registrazioni in due polarizzazioni: il campo elettrico, polarizzato linearmente, è una volta parallelo e una volta perpendicolare all'asse dei target. Il rapporto della Radar Cross Section nelle due polarizzazioni permette di rimuovere la dipendenza delle misure dalla profondità dei bersagli. In figura 1 è mostrato il rapporto tra le Radar Cross Section teoriche nelle due polarizzazioni, calcolate a  $f = 1 \text{ GHz}$  e  $v = 10 \text{ cm/ns}$ , in funzione del diametro dei tondini: la curva cresce con molta rapidità per tondini di piccole dimensioni, raggiunge il valore massimo (uno) per un target di diametro circa 26 mm, e poi comincia a decrescere.

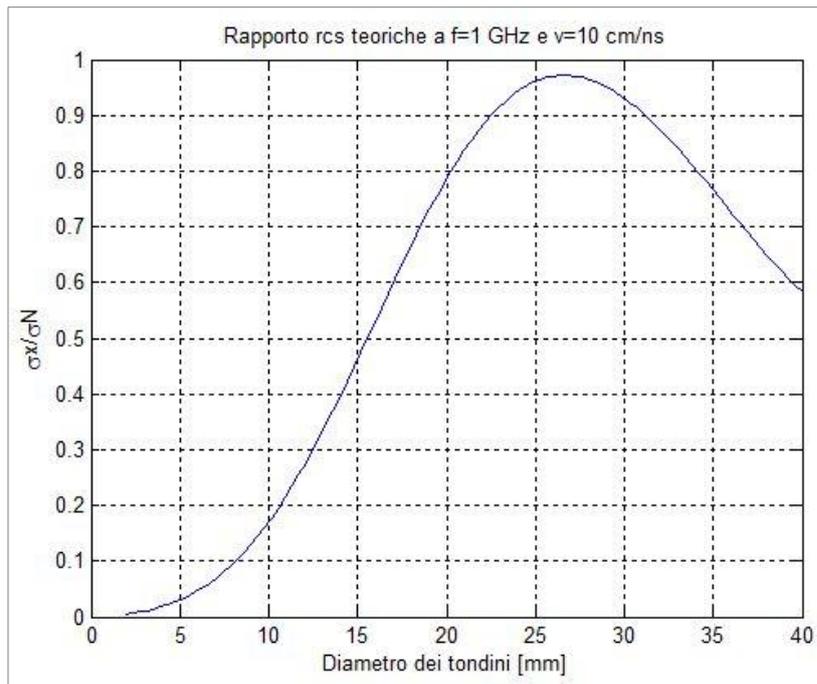


Fig. 1: Rapporto tra la RCS teorica in polarizzazione cross e quella in polarizzazione normale (calcolate a  $f=1$  GHz e  $v=10$  cm/ns), in funzione del diametro dei tondini.

L'obiettivo di questa Tesi è ricavare un metodo di analisi dei dati che porti a dei risultati quanto più simili alla situazione teorica, permettendo, così, una stima affidabile delle dimensioni dei tondini; per fare ciò, si sono elaborati dei dati sintetici e, una volta stabilita una sequenza di processing che fornisse buoni risultati, la si è adattata a delle misure acquisite presso il Politecnico di Milano nel 2005.

Pertanto, si sono dapprima prodotti i dati sintetici con il simulatore di onde elettromagnetiche GprMax, sviluppato da Giannopoulos presso il dipartimento di elettronica dell'Università di York. Questo software, col quale si può simulare una grande varietà di modelli, con diversi tipi di eccitazione e differenti geometrie e mezzi, risolve le equazioni di Maxwell col metodo numerico alle differenze finite nel dominio del tempo (FDTD).

Le acquisizioni simulate sono registrazioni (con due antenne alle frequenze di 1 GHz e 2 GHz, in polarizzazione normale e cross) del segnale riflesso da otto target cilindrici, di diametri compresi tra 6 mm e 40 mm, immersi in un blocco di cemento, alla profondità di 6 cm.

Prima di simulare i modelli d'interesse, sono state effettuate delle simulazioni preliminari al fine di stabilire il passo di discretizzazione, che è necessariamente diverso per le due frequenze: i modelli a 1 GHz sono discretizzati con passo pari a 2 mm, e quelli a 2 GHz con passo 0.5 mm.

Si sono, inoltre, parzialmente elaborati i dati reali per estrarre le ondi (diverse per le due frequenze) con cui eccitare le sorgenti dei modelli, e si sono realizzate ulteriori prove al fine di stabilire l'altezza dell'antenna sul cemento e il valore da assegnare alla conducibilità del calcestruzzo.

Si è quindi proceduto simulando le acquisizioni: per ogni frequenza sono stati creati otto modelli, ognuno consistente in un blocco di cemento al cui interno è sepolto un tondino in metallo. Per una stessa frequenza, l'unica differenza tra i modelli è la dimensione del bersaglio. Nelle figure 2, 3 e 4 è mostrata la geometria del modello del tondino da 40 mm di diametro, per la simulazione a 1 GHz.

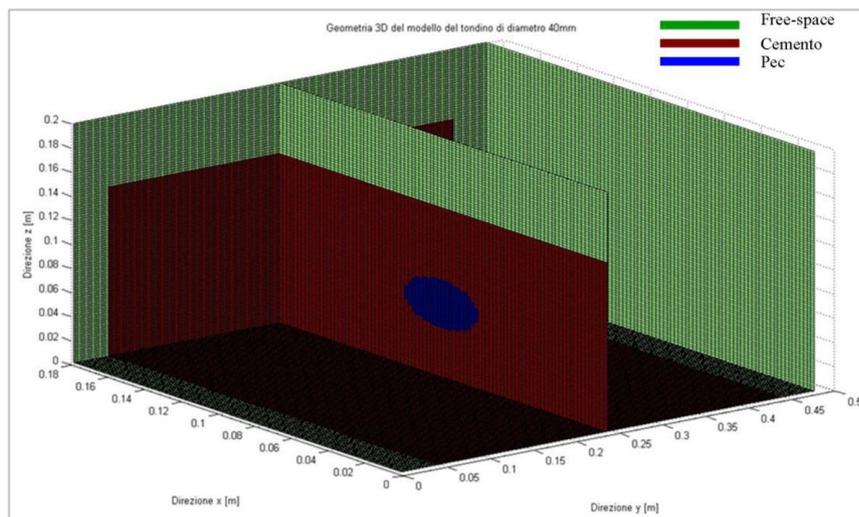


Fig. 2: Geometria del modello del tondino da 40 mm di diametro. Simulazione a 1 GHz.

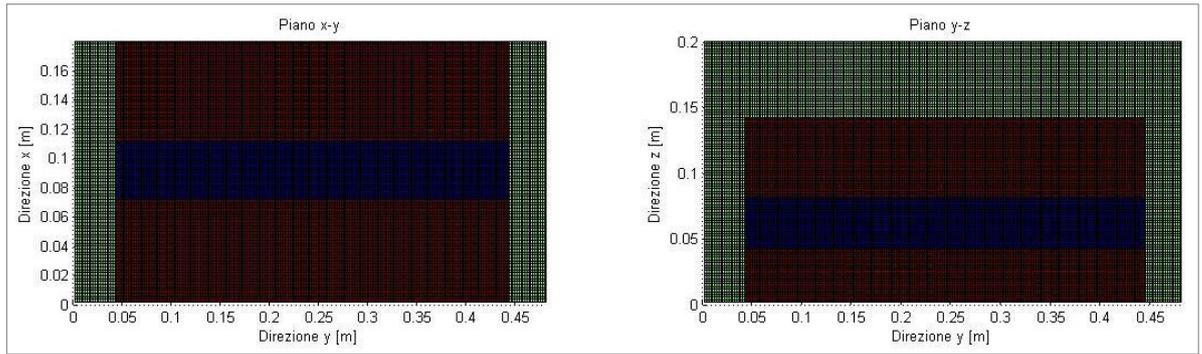


Fig. 3: Geometria del modello. A sinistra, vista dall'alto (piano x-y): il tondino si estende nella direzione y. A destra, sezione lungo l'asse del tondino (piano y-z). In verde il free-space, in blu il metallo, in bordeaux il cemento. Simulazione a 1 GHz.

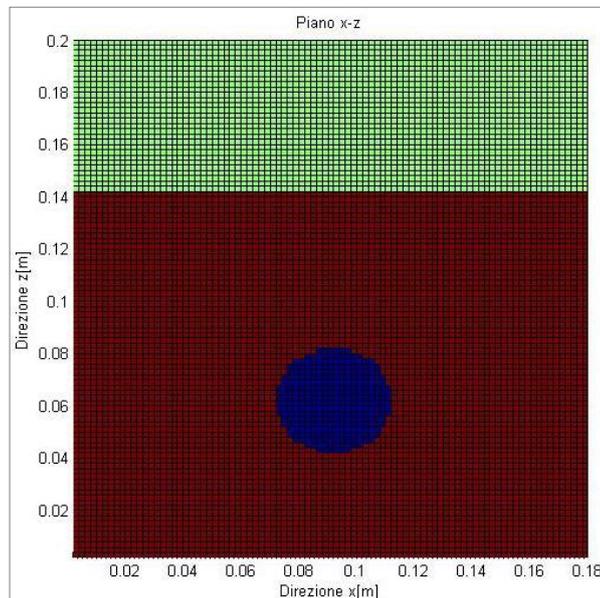


Fig. 4: Geometria del modello. Sezione del tondino (piano x-z). In verde il free-space, in blu il metallo, in bordeaux il cemento. Simulazione a 1 GHz.

Si sono, infine, simulate due registrazioni (una per frequenza) della riflessione di background (interfaccia aria-cemento), rimuovendo il target di metallo dai modelli già prodotti. Tale riflessione, infatti, costituisce un disturbo sui segnali reirradiati dai bersagli dai quali, pertanto, deve essere rimossa. Lo scopo di queste ultime due simulazioni è proprio quello di

disporre di una traccia che sarà sottratta, dopo opportune elaborazioni, ai segnali ottenuti simulando i vari tondini.

La sequenza di processing dei dati sintetici che ha portato, per entrambe le frequenze, a risultati coerenti con la teoria, prevede una calibrazione temporale, un filtraggio passa-banda e la rimozione del background.

Questa procedura di analisi è stata quindi estesa ai dati reali ma, in questo caso, si sono riscontrate delle difficoltà in seguito alla rimozione del segnale di background. Tale operazione è fondamentale per una corretta stima delle ampiezze, ma non sempre si riesce a rimuovere correttamente o totalmente la riflessione all'interfaccia aria-cemento, e ciò può alterare i valori di ampiezza dei picchi d'interesse. In seguito alla rimozione, pertanto, è necessario scegliere con attenzione quali picchi considerare per il calcolo delle ampiezze; tale scelta è prettamente empirica, non si è trovato un criterio generale che si rivelasse idoneo ad entrambe le frequenze: a 1 GHz, infatti, si è scelto di considerare le ampiezze di un solo picco, in particolare tralasciando quello più superficiale, maggiormente inficiato dal segnale di background; a 2 GHz, invece, si sono considerate le ampiezze picco-picco, spostandosi, però, nella traccia, in modo tale da fare riferimento a porzioni di segnale sicuramente non più compromesse dalla riflessione all'interfaccia aria-cemento. Poiché questi problemi non si sono riscontrati nei dati sintetici, si sono addebitati alla stessa registrazione del segnale di background: per i dati sintetici, la simulazione fornisce un segnale ideale perché è ottenuta eliminando il target cilindrico dal modello; nel caso reale, invece, si è posta l'antenna tra i due target più piccoli, e si è acquisito il segnale in polarizzazione cross, così da minimizzare il disturbo dovuto ai tondini adiacenti. Evidentemente il segnale non è perfettamente pulito e questo ha delle conseguenze sull'operazione di rimozione.

Nelle figure 5 e 6 sono mostrati i risultati alle due frequenze: il rapporto tra le RCS teoriche nelle due polarizzazioni (curva nera) è confrontato con il quadrato del rapporto delle ampiezze nelle due polarizzazioni, per i dati sintetici (curva rossa) e per quelli reali (curva blu).

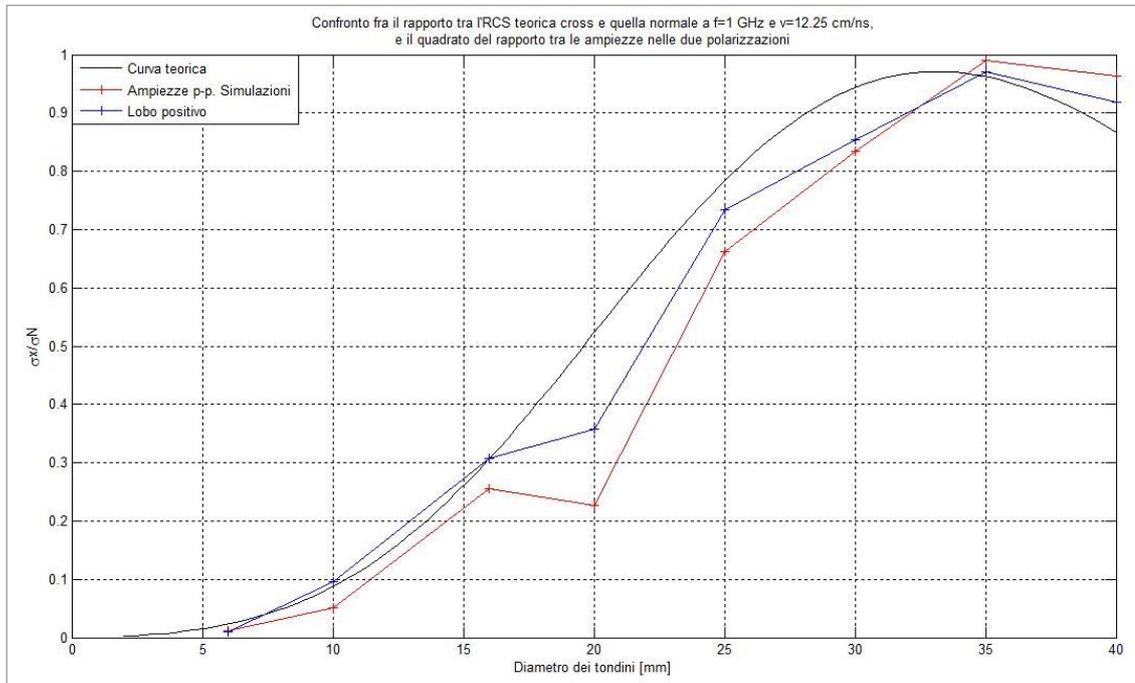


Fig. 5: Rapporti tra l'RCS in polarizzazione cross e quella in polarizzazione normale. Curva teorica e risultati delle simulazioni e dei dati reali. Dati a  $f=1$  GHz.

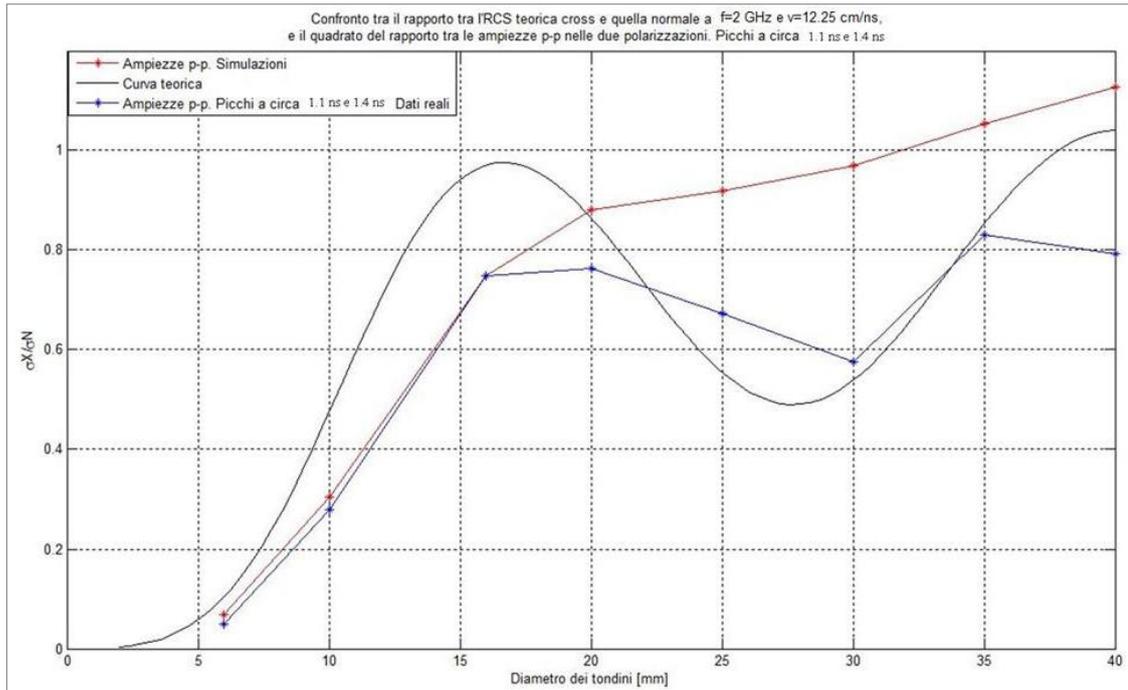


Fig. 6: Rapporti tra l'RCS in polarizzazione cross e quella in polarizzazione normale. Curva teorica e risultati delle simulazioni e dei dati reali. Dati a  $f=2$  GHz.

Dai risultati ottenuti elaborando i dati sintetici si deduce che un processing composto da calibrazione temporale, filtraggio passa-banda, e rimozione del background eventualmente preceduta da sovracampionamento, risulta appropriato, e produce un buon accordo con la teoria.

Affinché anche i dati reali concordino con la teoria, permettendo di estrarre un'informazione di ampiezza diffratta dai bersagli poco inficiata dal segnale di background, è necessario, in seguito alla suddetta elaborazione, scegliere con attenzione a quali picchi fare riferimento per il calcolo delle ampiezze. La bassa profondità dei target, infatti, fa sì che, anche in seguito a tale analisi, la riflessione all'interfaccia aria-cemento disturbi il segnale riflesso dai bersagli, alterandone i valori di ampiezza: picchi troppo superficiali del segnale alterano i risultati perché evidentemente ancora disturbati dalla presenza del background.

Il modelling ci ha permesso non solo di stabilire una sequenza di processing appropriata, ma anche d'individuare la causa delle difficoltà

riscontrate coi dati reali, nella stessa acquisizione del segnale di background: la riflessione *ideale* all'interfaccia aria-cemento prodotta con le simulazioni, infatti, riesce ad essere rimossa efficacemente, in modo tale che il picco più superficiale del segnale di riflessione del bersaglio non ne sia più influenzato.

Per le acquisizioni reali, data la vicinanza dei bersagli, è impossibile registrare un segnale di background come quello simulato, e ciò rende necessaria, in seguito all'elaborazione dei dati, un'attenta scelta dei picchi di riferimento.