**ASSOCIAZIONE TECNOLOGI PER L'EDILIZIA**
**E IL COLLEGIO DEGLI INGEGNERI DI PADOVA**

COL PATROCINIO DELL'

ORDINE DEGLI INGEGNERI DI PADOVA

## XXXVII CONVEGNO ATE
## "AMBIENTI INTERRATI IN PRESENZA DI FALDA"

**METODI DI IMPERMEABILIZZAZIONE**
**ASPETTI ARCHITETTONICI, GEOTECNICI**
**E TECNOLOGICI**

**Mercoledi', 19 giugno 2002, Padova**

# Indagini interferometriche satellitari per la misurazione dei movimenti del terreno causati da scavi in falda

**Lorenzo Jurina**
Politecnico di Milano, DIS
www.jurina.it
studio.jurina@tiscalinet.it

# Indagini interferometriche satellitari per la misurazione dei movimenti del terreno causati da scavi in falda

**Lorenzo Jurina**
Politecnico di Milano, DIS
www.jurina.it
studio.jurina@tiscalinet.it

Negli scorsi mesi sono stato incaricato di redigere una perizia di parte per una causa che credo significativa in relazione all'argomento degli scavi in falda di cui si sta trattando in questo convegno. Intendo quindi proporre all'attenzione del lettore un breve resoconto di questa mia esperienza.

La causa verteva sui danni strutturali subiti da alcuni monumenti della città di Rovigo, danni che venivano imputati ad uno scavo effettuato nelle loro vicinanze per creare un parcheggio sotterraneo.

I sopralluoghi effettuati hanno, in effetti, evidenziato che la chiesa della Rotonda, la chiesa di S. Francesco e la relativa Canonica ed anche la chiesa del Cristo abbiano manifestato alcuni significativi cedimenti strutturali, verificatisi nel breve lasso di tempo di alcuni mesi.

In particolare la chiesa della Rotonda (Figg. 1 e 2) ha una pianta poligonale piuttosto compatta con uno snello porticato sul perimetro. L'architrave continua posta al di sopra dei pilastri rappresenta un elemento vulnerabile nel caso di cedimenti differenziali.

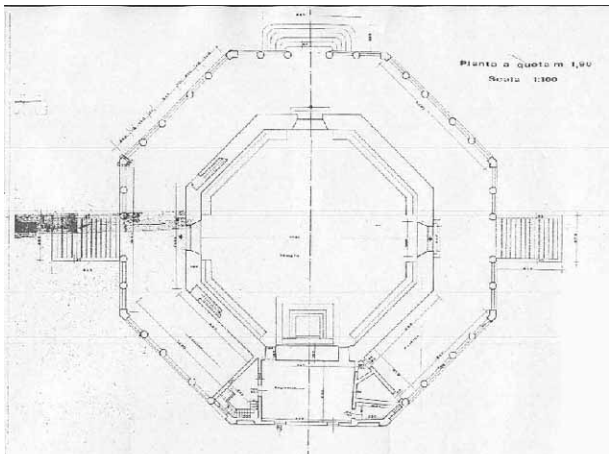


**Figure 1 e 2 La chiesa della rotonda, prospetto e pianta**

I rilievi (Fig. 3) illustrano il quadro fessurativo, di recente origine, che si può osservare sull'architrave e sulle pareti in muratura soprastanti i pilastri. Le fessure sono concentrate in prossimità dell'appoggio delle architravi sulle colonne e interessano anche le murature nelle zone prossime alle finestre, che sono i punti meno resistenti. L'architrave, ruotando a causa del diverso movimento verticale delle colonne stesse, danneggia la muratura circostante, con rischio di crollo locale.

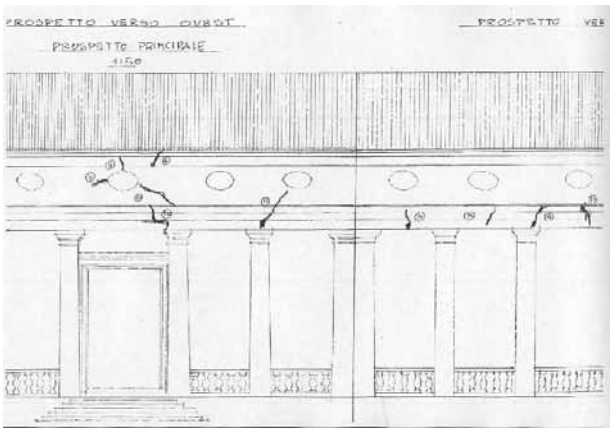


**Figura 3 a,b  Il rilievo del quadro fessurativo**

**Figura 4 Alcune delle lesioni che si trovano all'interno dell'edificio**

**Figura 5 Alcuni "vetrini"  posti per controllare lo svilupparsi delle fessure**

I danni strutturali sono rintracciabili anche all'interno dell'edificio a significare che in varie zone tutta la muratura, di spessore superiore a 60 cm, è interessata dal fenomeno (Figg. 4 e 5).

Le testimonianze riferiscono che il quadro fessurativo si è formato e/o si è aggravato in concomitanza con i lavori di scavo e di emungimento d'acqua nell'adiacente cantiere tra il 1994 ed il 1995.

La **Canonica** adiacente alla chiesa di S.Francesco è un edificio molto lungo e snello, costruito probabilmente per accorpamenti successivi e di caratteristiche tipologiche più povere rispetto alla vicina chiesa (Figg. 6 e7).

In questo edificio il quadro fessurativo strutturale si manifesta con grande evidenza (Figg. 8 e 9) e l'analisi ravvicinata delle superfici conferma che il fenomeno è di origine recente. Malgrado la notevole distanza tra la Canonica ed il cantiere, 150 metri circa, i cedimenti non omogenei del terreno di fondazione hanno provocato rotture e distacchi tra le varie parti che, oltre a rappresentare di per sé un rischio di collasso, comportano una notevole diminuzione del grado di sicurezza di assieme dell'edificio, che, come sempre avviene negli edifici storici in muratura, è affidato prevalentemente alla monoliticità dell'assieme ad al fatto che le varie murature si possano aiutare mutuamente. La presenza di giunti, fessure e separazioni impedisce questa forma di funzionamento e porta ad un forte incremento del rischio.

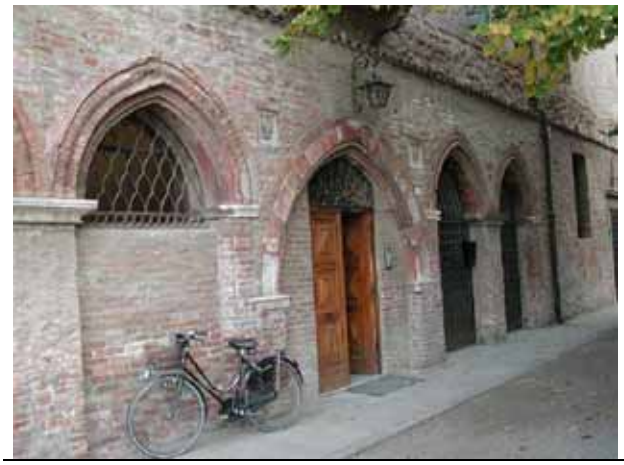


**Figura 6 La canonica di S. Francesco**

**Figura 7 Una vista della chiesa di S. Francesco e della Canonica**

**Figure 8 e 9 L'interno della Canonica**

**Figura 10 Una delle lesioni che si sono riaperte**

**Figura 11 L'interno della chiesa: particolare di una delle lesioni**

Nella **chiesa di S.Francesco** (Figg. 10 e 11) le fessure interessano prevalentemente le murature in vicinanza della facciata e le pareti più sollecitate dalla spinta divaricante degli archi e delle volte. Alcune delle fessure presentano tracce di sigillatura effettuata nel passato ma è evidente che si sono riaperte recentemente.

La **Chiesa del Cristo** è stata oggetto di recenti interventi di consolidamento statico e di restauro delle superfici danneggiate, che oggi impediscono di analizzare *de visu* il degrado avvenuto. La documentazione fotografica, tuttavia, reperita grazie alla cortese collaborazione dell'Impresa di costruzioni IAR di Rovigo che ha eseguito gli interventi, illustra con efficacia il danneggiamento strutturale subito dalla chiesa. Anche qui le colonne della navata principale hanno presentato movimenti differenziali e movendosi hanno lesionato le soprastanti architravi e le soprastanti volte. Gli interventi, che non hanno potuto riportare "a piombo" le colonne, ancora oggi inclinate, hanno interessato le architravi e le volte che sono state fasciate con materiali fibrorinforzati (Fig.12)

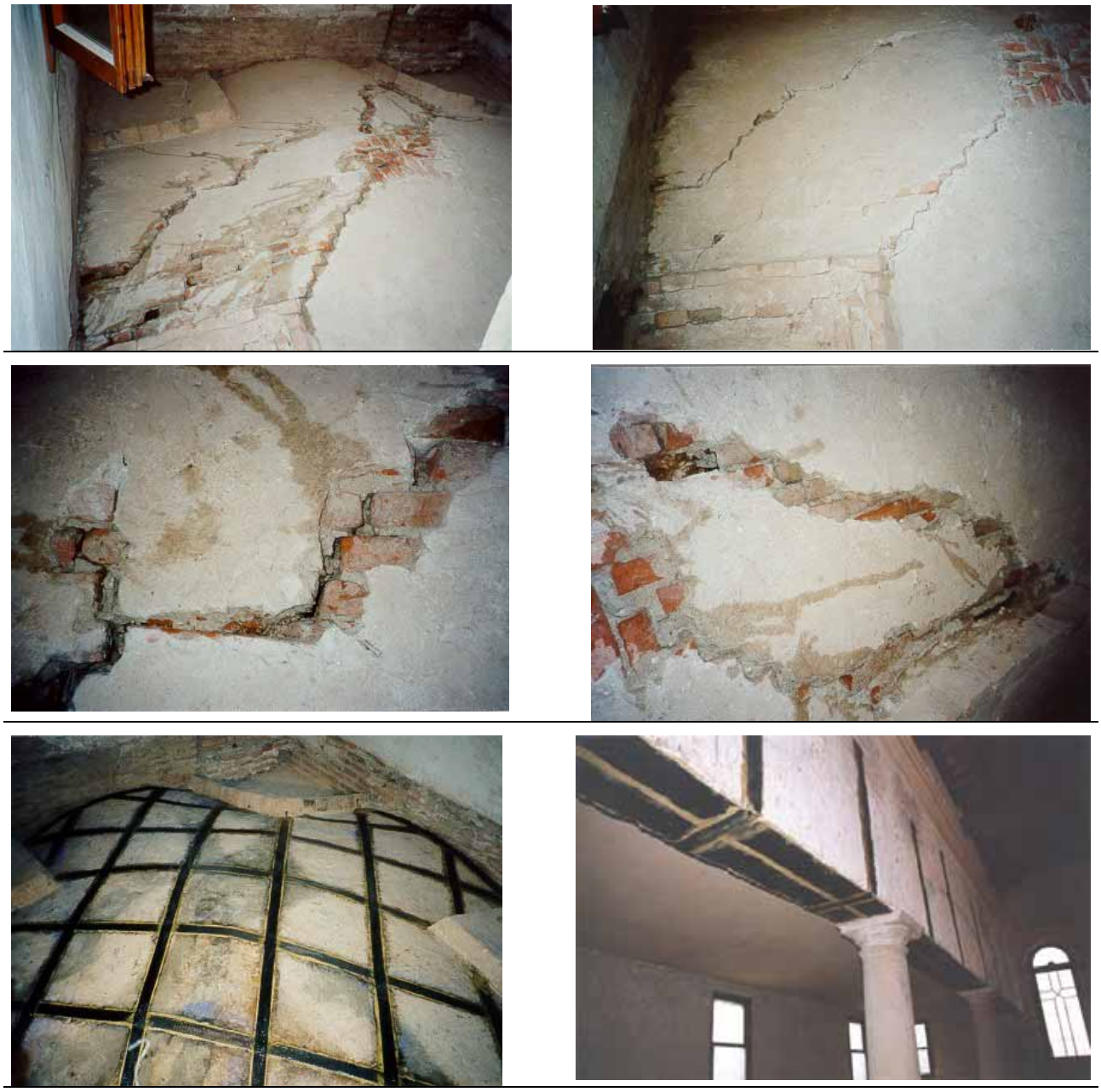


**Figure 12 a,b,c,d I danni riscontrabili sulle volte ed il restauro strutturale realizzato utilizzando i materiali fibrorinforzati**

Oltre ai monumenti appena presi in esame anche parte del tessuto del centro storico di Rovigo, in adiacenza al citato cantiere, ha subito lesioni di varia gravità, come si può ben vedere dalle immagini che seguono (Fig. 13 a,b,c,d).

**Figure 13 a,b,c,d Lesioni presenti in edifici prossimi all'area di scavo, in cui i cedimenti sono proseguiti ben oltre la chiusura dello scavo e la posa dei vetrini di controllo**

Una volta riscontrato il danno, si è reso necessario comprendere se e come lo scavo del posteggio interrato avesse potuto causare i danni rivelati.

A dire il vero, l'analisi degli elaborati progettuali e la verifica delle parti realizzate sembrano avvallare, già da sole, la tesi che indicava lo scavo come responsabile dei fatti.

Il progetto, infatti, prevedeva originariamente una profondità dei diaframmi di 15 metri, cosa che avrebbe consentito di intercettare due strati argillosi impermeabili, l'adozione di tiranti con lo scopo di vincolare in sommità i pannelli di diaframma, nonché l'esecuzione di un "tappo impermeabilizzante " di fondo realizzato mediante la tecnica del jet-grouting.

In realtà sono state apportate in corso d'opera alcune modifiche sostanziali al progetto che hanno previsto, tra le altre cose, di limitare i diaframmi ad una profondità di soli 10.8 metri, sufficiente appena ad intestarsi, senza neanche attraversarlo completamente, nel primo strato argilloso.

I previsti tiranti, inoltre, sono stati sostituiti dallo stesso terreno a valle che, durante lo scavo della parte centrale del cantiere, formava una ripida "scarpata" a ridosso del diaframma e poi, in una seconda fase, da puntoni metallici semplicemente appoggiati ad un terreno poco trattato.

L'impermeabilizzazione del fondo, fortemente consigliabile per scavi in un ambiente come Rovigo dove la falda è particolarmente alta, è stata sostituita da un trattamento del terreno superficiale di

fondo scavo in cui si è impastato del cemento alla sabbia in situ, ottenendo una protezione solo superficiale, incapace di garantire una buona miscelazione tra terra e legante e quindi una efficace impermeabilizzazione. Il trattamento, poi, è stato eseguito solo a scavo ultimato ed ha comportato un ulteriore approfondimento dello scavo. È anche improbabile che il trattamento abbia potuto essere applicato sull'intera superficie di scavo quando era ancora presente una gran quantità di terreno posto "a scarpata".

Occorre ancora notare come nella zona della rampa di accesso ai box i pannelli abbiano una profondità inferiori ai 10,80 metri. La giustificazione addotta per tale scelta progettuale è stata che, proprio in quell'area, vi era un grosso canale fognario interrato. Questo, però, avrebbe dovuto suggerire un intervento di impermeabilizzazione tale da impedire l'enorme quantità di acqua che attraverso quel varco avrebbe potuto, come del resto è successo, entrare nel perimetro dei diaframmi. Bisogna ancora notare quanto sia inutile, ed anzi in alcuni casi dannoso, cintare con un perimetro di diaframmi impermeabilizzanti una zona interna, lasciando un varco di grandi dimensioni su uno dei lati.

Date queste premesse non stupisce che la grande vasca si sia riempita con grande rapidità nel momento che i well-points, che avevano funzionato ininterrottamente per mesi per tenere basso il livello dell'acqua, sono stati spenti. Si è allora reso necessario emungere acqua dallo scavo, creando effetti locali di scavernamento in prossimità dei diaframmi e cedimenti del terreno nelle zone prossime al cantiere.

Una osservazione specifica merita la verifica a sifonamento condotta durante le operazioni di scavo a seguito di un sopralluogo da un consulente che, verificando il progetto, ha individuato un coefficiente di sicurezza pari a soli 1,05.

**Figure 14 a,b,c,d Lo scavo del posteggio interrato**

Ad avvalorare la tesi che sia stato proprio l'abbassamento della falda freatica della città, dovuta alle operazioni di cantiere appena descritte, a modificare gli equilibri idrogeologici della zona vi sono due fatti.

Il primo è che edifici anche lontani oltre 100 metri dalla zona di scavo hanno presentato cedimenti e conseguenti lesioni nello stesso periodo di forte emungimento dell'acqua.

Il secondo è costituito dalle misurazioni effettuate dal Comune di Rovigo che indicano quantità molto rilevanti di acqua emunta giornalmente dallo scavo e trasferita in fognatura. Vengono indicate quantità attorno agli 800-1000 metri cubi al giorno.

Riassumendo, nella progettazione e realizzazione di questo progetto non si sono tenuti in conto due importanti fatti: che i diaframmi non sono tutti spinti alla stessa profondità, ma esiste un ampio varco nel perimetro impermeabile e che l'intero scavo è ubicato all'interno di una zona di terreno più permeabile e meno addensato che interessa Rovigo, costituito da un "paleoalvo".

Entrambi questi fatti hanno causato un quantitativo di acqua da emungere molto superiore al previsto, con conseguente forte abbassamento della falda, e una estensione geometrica della zona interessata molto maggiore del previsto.

Per provare definitivamente la validità di quanto affermato si è proposto di "misurare" direttamente, anche se "a posteriori", i cedimenti verificatisi nel periodo 1994-1995 attorno allo scavo.

In sintesi si è cercato se esisteva una modalità sperimentale per misurare, oggi nel 2002, eventuali movimenti anomali del terreno nella zona in oggetto avvenuti a partire dal 1992 , comprendendo così nell'analisi sia il periodo storico che l'area geografica in cui sono stati effettuati gli scavi e gli emungimenti.

Lo strumento è stato fornito da una tecnica sviluppata e brevettata recentemente da alcuni colleghi all'interno del Dipartimento di Elettronica del Politecnico di Milano (il prof. Rocca, il prof. Prati e l'ing.Ferretti), denominata "Permanent Scatters Technique".

Si tratta di un miglioramento sostanziale e ben collaudato delle tecniche classiche di interferometria satellitare SAR, che consentono la lettura ed il confronto di immagini radar ed in particolare quelle della zona di Rovigo, acquisite via satellite negli ultimi 10 anni con cadenza mensile. In altre parole si tratta di confrontare tra loro una serie molto numerosa di "fotografie" radar della zona, prese a intervallo costante, per valutarne eventuali differenze.

Le analisi dei rilievi radar sono state eseguite dalla Società "Tele-Rilevamento Europa" –T.R.E. srl, una società compartecipata dal Politecnico di Milano, in cui è stata sviluppata, per lo sfruttamento del brevetto internazionale e che può vantare un ampio riconoscimento a livello internazionale.

Prima di riportare i dati trovati ritengo interessante proporre una più ampia descrizione del metodo utilizzato. Una bibliografia recente e completa è fornita in appendice.
Scopo dei sistemi radar satellitari è fornire immagini elettromagnetiche della superficie terrestre. Uno dei vantaggi di tale sistema di telerilevamento dallo spazio rispetto ai più noti sistemi ottici è la possibilità di osservazione continua sia di giorno sia di notte (essendo un sistema attivo) e anche in presenza di copertura nuvolosa (le frequenze utilizzate penetrano senza sensibili attenuazioni attraverso le nuvole). Il secondo vantaggio risiede nel fatto che, le immagini SAR consentono di operare misure di deformazione superficiali su vaste aree (migliaia di chilometri quadrati) con precisione centimetrica o persino millimetrica e con elevata densità spaziale.

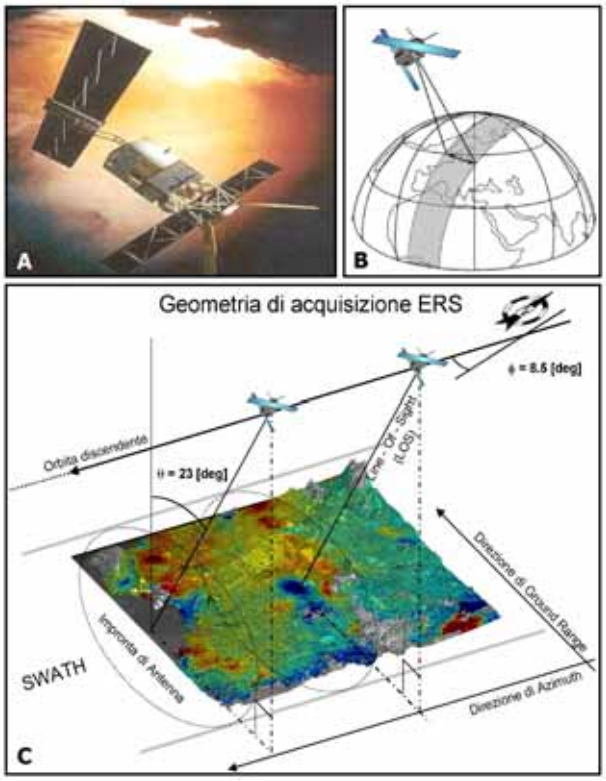



**Figura 15 I satelliti ERS-1/2 dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA).**

A tal fine, particolare importanza riveste l'archivio storico creato a partire dalle acquisizioni dei satelliti ERS-1 ed ERS-2 dell'Agenzia Spaziale Europea (Figura 15). ERS-1 ha acquisito dati dalla fine del 1991 a marzo 2000. ERS-2 è operativo dall'inizio del 1995. I satelliti ripercorrono la stessa orbita nominale ogni 35 giorni illuminando attivamente la medesima area a terra con un segnale alla frequenza di 5.3 GHz (lunghezza d'onda $\lambda$ = 5.66 cm). La risoluzione a terra è di circa 5x20 m.
Una delle principali applicazioni dell'interferometria SAR è la ricostruzione di mappe di deformazione della superficie terrestre. A tal fine, si rende necessaria un'analisi estremamente accurata dell'informazione contenuta nelle immagini radar, nel tentativo di estrarre gli eventuali contributi relativi alle variazioni di distanza sensore-bersaglio a terra. I termini spuri, in particolar modo le distorsioni introdotte dalle condizioni atmosferiche, agiscono come fattori di disturbo e devono essere stimati e rimossi dai dati. La lettura dei dati è poi notevolmente complicata dal fatto che solo su alcuni bersagli a terra si riescono ad ottenere misure accurate (tipicamente fabbricati, infrastrutture, rocce esposte, ecc.).

I limiti dell'approccio classico alle misure di spostamento sono proprio legati al problema dell'individuazione dei bersagli radar su cui si possono ottenere misure affidabili e al contributo atmosferico di fase che sovente genera effetti difficili da distinguere da fenomeni di movimento del terreno. Anche per questi motivi, l'analisi dei moti del terreno con immagini radar satellitari non ha trovato riscontro significativo nel mercato internazionale, se non in poche applicazioni di nicchia, molto vicine alla ricerca universitaria. Di fatto, il GPS e le compagne di livellazione ottica hanno continuato ad essere le sole sorgenti di informazioni, relativamente a moti crostali, per quasi tutti gli utenti e le applicazioni.
Le difficoltà a cui si accennava sono state in gran parte risolte tramite la tecnica dei diffusori permanenti (*Permanent Scatterers,* PS), messa a punto e brevettata presso il Dipartimento di Elettronica del Politecnico di Milano a seguito di oltre 15 anni di ricerca nel campo dell'interferometria. Una tecnologia italiana superiore, almeno a quanto ci è dato sapere, anche a quanto presente nel panorama americano.

L'approccio PS è basato sull'osservazione che un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, mostrano caratteristiche ideali per misure accurate di spostamento. Per ricavare informazione utile è necessario che la densità spaziale di PS sia sufficientemente elevata (maggiore di 5-10 PS/km$^2$), ed i moti dei bersagli radar siano sufficientemente lenti (velocità inferiori a 5-6 cm/anno).
Le informazioni ottenute da un'analisi PS possono essere utilizzate per diversi fini, in genere legati alla zonazione del territorio (ad es. per l'aggiornamento dei piani regolatori). In aree ad elevata urbanizzazione, la densità spaziale di PS raggiunge valori molto alti: 100-400 PS/km$^2$. Tipicamente, utilizzando l'intero archivio storico ESA è possibile, in area urbana, monitorare il 70-80% degli edifici.
Possibili impieghi di questo tipo di informazioni sono i seguenti:

- individuazione aree soggette a subsidenza (a causa di prelievi di acqua, gas o idrocarburi dal sottosuolo)
- individuazione aree soggette a fenomeni franosi e di instabilità di versante (in aree non troppo vegetate e per moti sufficientemente lenti)
- monitoraggio di zone vulcaniche
- analisi dei moti in prossimità di faglie sismiche
- analisi di stabilità dei fabbricati (si pensi al famoso "libretto del fabbricato")
- analisi di stabilità dei beni architettonici e degli edifici pubblici

analisi di stabilità delle zone adiacenti a impianti sensibili (dighe, centrali, ecc.)
La tecnica PS permette di spingersi ai limiti teorici previsti per applicazioni interferometriche satellitari. In corrispondenza di ogni singolo PS si ricava il trend medio di deformazione con accuratezza compresa tra 0.1 e 1 mm/anno (l'accuratezza è comunque funzione del numero di immagini e della "qualità" del bersaglio). Con l'interferometria SAR convenzionale risulta possibile ottenere questi valori solo in circostanze particolari, difficilmente riscontrabili.
È, inoltre, possibile ricostruire l'intera serie temporale di deformazione del PS, utilizzando con successo tutte le immagini acquisite dai satelliti ESA, e non solo un sottoinsieme di queste; l'accuratezza arriva (per i punti migliori) a 1-2 mm su ogni singola misura. Anche in questo caso, la tecnica PS è unica. In primo luogo, si riescono ad individuare singole strutture soggette a moto (a differenza di quanto si opera con l'approccio standard, dove si individuano "aree soggette a spostamento"). L'accuratezza delle serie temporali PS non ha poi eguali nella letteratura scientifica, dal momento che su un largo numero di PS si riesce a separare con successo i contributi di moto da quelli spuri atmosferici.
A titolo di esempio, si ricorda che la tecnica PS è stata utilizzata con successo per verificare la stabilità dei palazzi circostanti agli edifici collassati a Camaiore (1995), Roma (1998) e a Foggia (1999), d'accordo con il Dipartimento della Protezione Civile (su invito del sottosegretario pro-tempore Franco Barberi).
I PS costituiscono una sorta di "rete geodetica naturale" che consente l'analisi di fenomeni di deformazione superficiale. Si tratta di uno strumento di monitoraggio senza eguali per accuratezza, densità spaziale di punti di misura e competitività economica, in particolare nello studio di fenomeni di subsidenza urbana e di deformazione lungo faglie sismiche in aree di estensione di centinaia o migliaia di chilometri quadrati.

Un ulteriore notevole aspetto vantaggioso è costituito dalla ricchezza di dati disponibili nell'archivio ERS dell'ESA. È possibile avviare un'analisi PS oggi, avendo a disposizione dati acquisiti a partire del 1992 e potendo, quindi, ricostruire la storia passata dell'area di interesse.

La tecnica è stata validata confrontando i risultati con quelli ottenuti tramite livellazione ottica (zona di Ancona) e misure GPS differenziali (California). Recentemente sono stati presentati anche i risultati relativi al confronto tra dati PS e misure di livellazione ottenute dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). L'accordo ottenuto con le tecniche convenzionali è notevolissimo ed ha mostrato come le stime teoriche sull'accuratezza ottenibile con la tecnica PS (1-2 millimetri di accuratezza sulla singola misura - nei casi migliori) siano di fatto confortate dai risultati sperimentali.
I limiti relativi alla tecnica PS consistono nella facoltà di apprezzare solo la deformazione lungo la direzione di LOS (Line Of Sight, ovvero la congiungente sensore-bersaglio a terra), cioè approssimativamente lungo la verticale, e nel fatto che per portare a termine con successo l'analisi

PS è necessario che l'area oggetto di studio presenti una densità sufficiente di diffusori permanenti (quantomeno lieve urbanizzazione oppure presenza di rocce esposte; aree fortemente vegetate non risultano monitorabili). Da ultimo, per l'analisi di fenomeni di deformazione con evoluzione particolarmente rapida (ad es. un improvviso fenomeno di subsidenza, o un moto franoso veloce), il problema legato all'equivocazione di fase può complicare notevolmente l'interpretazione. La tecnica interferometrica SAR consente infatti di valutare con accuratezza millimetrica variazioni di distanza sensore-bersaglio pari ad una frazione della lunghezza d'onda (5.66 cm per i satelliti ESA ERS), ma eventuali "salti" di diversi centimetri vengono "equivocati" ovvero non è possible "contare" il numero intero di lunghezze d'onda. Al limite, se il bersaglio si muovesse esattamente di mezza lunghezza d'onda (2.8 cm per i satelliti ERS) non risulterebbe possible misurare alcuna variazione di fase rispetto al caso di bersaglio fermo.

I dati PS possono, comunque, contribuire in modo determinante alla conoscenza del territorio, anche considerandone i limiti. Molti fenomeni geofisici, infatti, risultano compatibili con i vincoli tecnologici della tecnica PS.

Tornando al caso di studio, all'interno dell'incarico eseguito per conto del Ministero dei Beni Culturali, in collaborazione con l'Avvocatura di Stato, ho analizzato la distribuzione dei cedimenti, avvalendomi della collaborazione della società Enel-Hydro SpA che ha materialmente elaborato i dati, fornendo i grafici delle serie temporali e le mappe dei contours ottenuti dalla interpolazione delle differenze delle medie degli spostamenti a cavallo del periodo di scavo, sovrapposte alla carta tematica della zona di interesse.

Il confronto tra le immagini radar, realizzato in un numero notevole di punti (145 per la precisione, divisi in due set separati di punti, denominati (A) ascendenti e (D) discendenti, rispettivamente) e relativo a tutta la città di Rovigo ed in particolare alla zona attorno alla zona oggetto di analisi, ha fornito risultati diagnostici estremamente interessanti.

I principali risultati sono i seguenti:

- tutta la zona di Rovigo e dintorni è interessata da un fenomeno di subsidenza generalizzata con valori dell'abbassamento medio pari a circa 1,2 mm all'anno, circostanza che provoca un movimento rigido e sostanzialmente uniforme del terreno, tale da non provocare danni agli edifici. Questo fenomeno, peraltro già noto nella zona, è confermato dalle misure eseguite tramite interferometria SAR.
- in zone distanti dall'area di analisi non si nota statisticamente alcun incremento significativo, né alcuna discontinuità degli spostamenti tra prima e dopo la esecuzione di lavori
- in una zona piuttosto allungata, estesa in direzione Est-Ovest a lato del cantiere , di dimensioni in pianta pari approssimativamente a 80 x 200 metri , e nel periodo a cavallo tra il 1994 e il 1995, e solo in quel periodo, si osserva un brusco incremento dei cedimenti nell'arco di un anno (ossia una discontinuità anomala) che nelle zone più prossime arriva a superare i 2 centimetri, toccando il valore di 1,5 cm anche alla notevole distanza di 100 metri dalla zona di scavo
- Le analisi del punto precedente hanno fornito valori della entità dei cedimenti del terreno che sono sostanzialmente analoghi per la zona di interesse, sia a partire dal gruppo delle misure (A) ascendenti che da quelle (D) discendenti, relative a postazioni diverse, confermando la validità dei risultati ottenuti
- La distribuzione sul territorio di tale discontinuità improvvisa nei cedimenti non è uniforme e presenta dei picchi più o meno accentuati, verosimilmente indotti dalle caratteristiche locali del suolo, non omogenee, ossia caratterizzate dalla presenza o meno di lenti di terreno più deformabile. Ciò dà luogo a cedimenti differenziali delle fondazioni, a loro volta causa delle lesioni negli edifici.
- Le variazioni stagionali della falda, sia quelle degli anni precedenti che di quelli successivi ai lavori oggetto di causa non hanno minimamente influenzato l'andamento dei cedimenti

del terreno, né in zone vicine, né in quelle lontane dai lavori. In altre parole l'effetto delle variazioni stagionali, di breve durata, della altezza di falda è ininfluente sui cedimenti

- Gli effetti del cedimento avvenuto a cavallo tra il 1994 e il 1995 sono irreversibili**,** nel senso che nei successivi 6 anni di misurazione non risulta che siano stati recuperati. In altre parole l'andamento non torna ad approssimarsi, neppure asintoticamente, all'andamento precedente gli scavi.

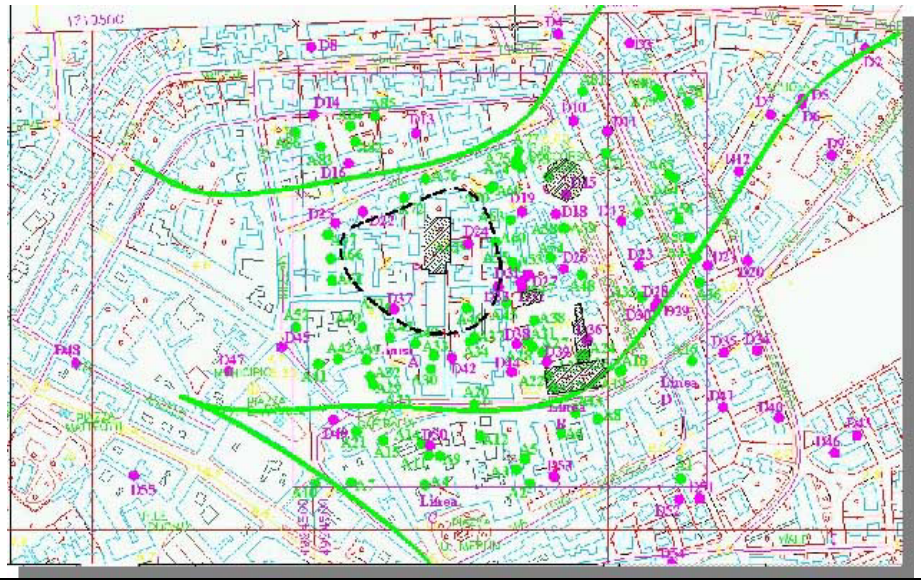
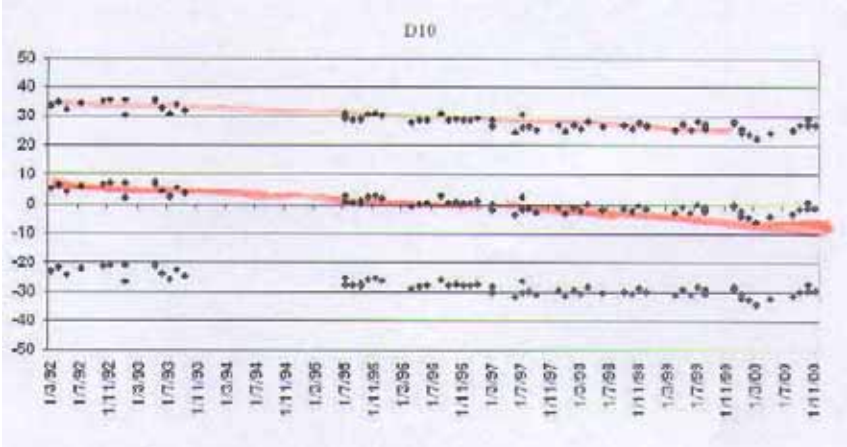


**Figura 16 Posizione e numerazione dei punti di misura "Ascendenti" e "Discendenti"**



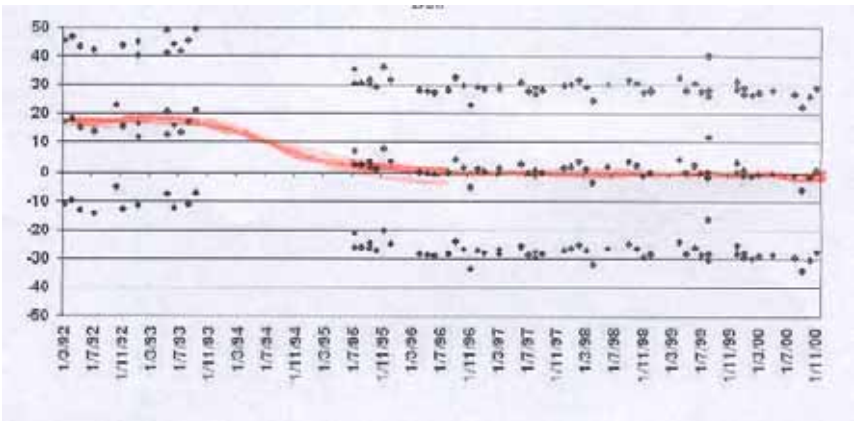



**Figure 17 a,b Risultati delle letture mensili eseguite dal 1992 al 2000. Nel primo grafico, in una zona distante dagli scavi, si nota solo il fisiologico cedimento prodotto dalla subsidenza. Nel secondo, a 30 metri circa dallo scavo, si nota la discontinuità avvenuta tra il 1994 ed il 1995, pari a circa 20 millimetri.**

E' necessario osservare che l'estensione geometrica della zona allungata di 80 x 200 metri in cui sono presenti i maggiori cedimenti è sovrapponibile all'andamento della zona di paleoalveo (Fig. 18) in cui le caratteristiche del terreno, diverse rispetto alle zone laterali in quanto meno addensate e quindi più permeabili, inducono un maggiore abbassamento della falda a seguito dell'emungimento e, di conseguenza, una maggiore tensione efficace sul terreno sottostante e, ancora di conseguenza, un maggiore cedimento del terreno stesso.

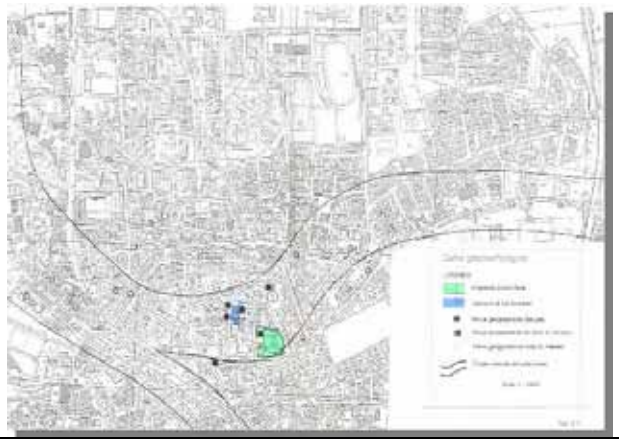
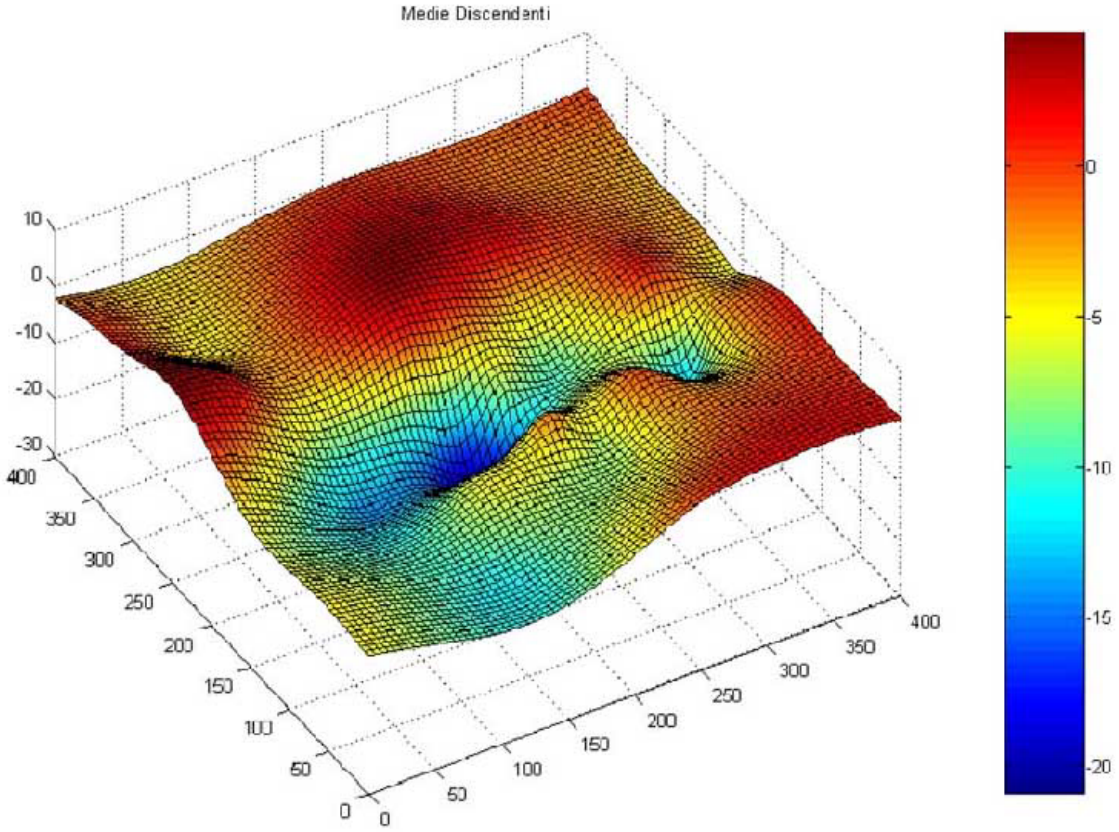
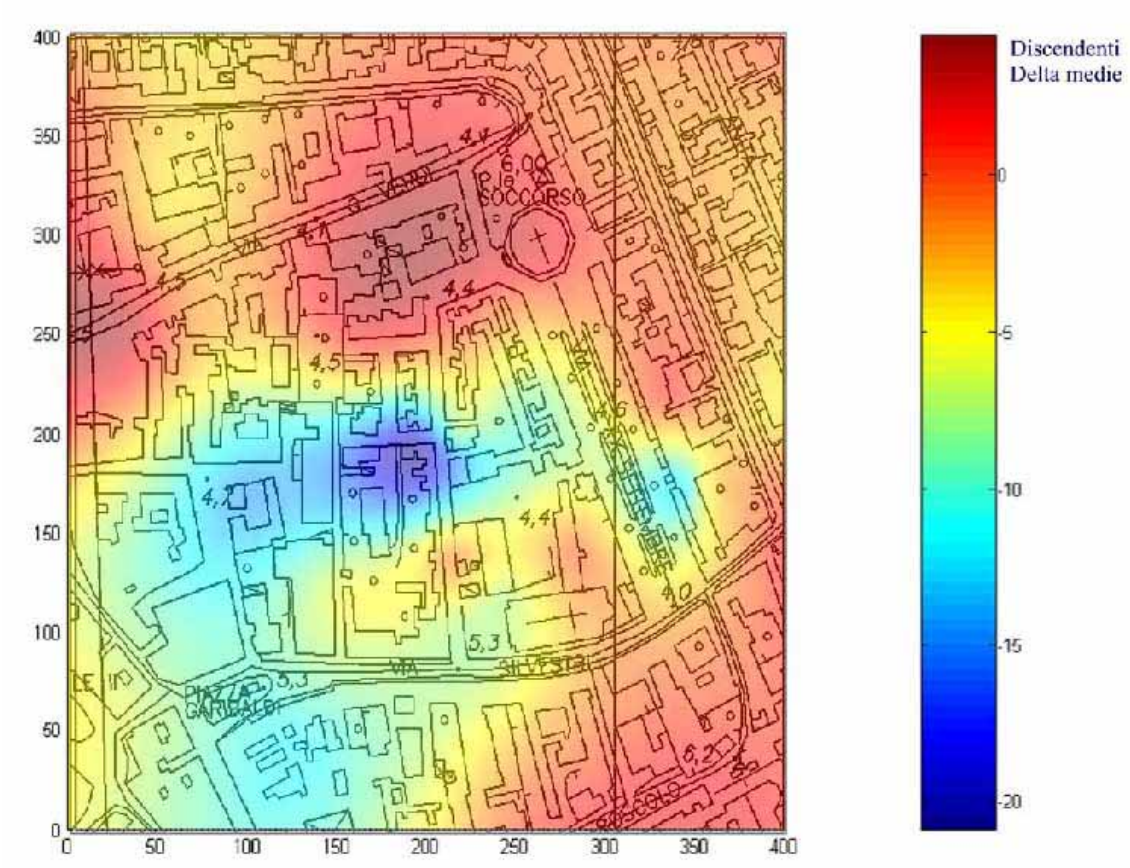


**Figura 18 Carta geo-morfologica e carta delle isofreatiche al 30 gennaio 1995 (prime due tavole) ed al 2 maggio 1995**


Medie Discendenti


Discendenti
Delta medie

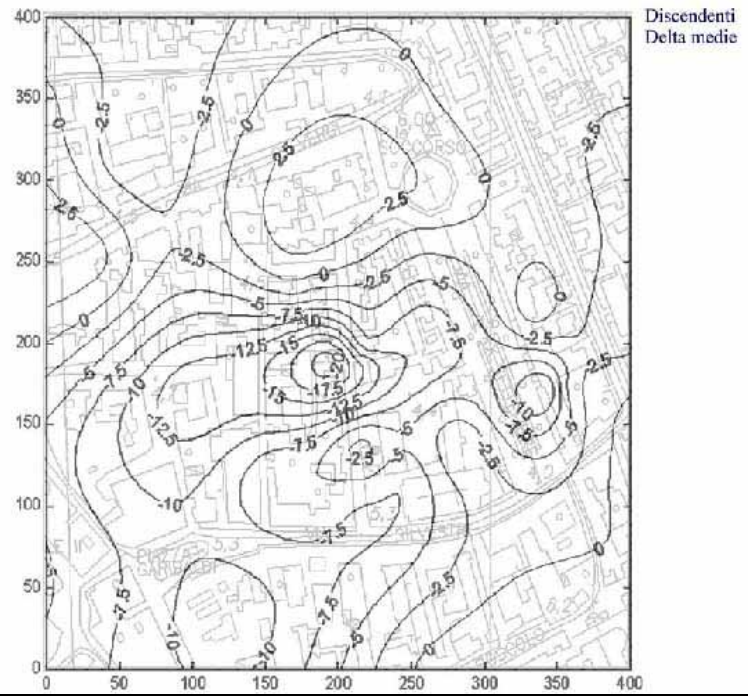



**Figura 19 Contours e linee di livello degli incrementi di cedimento misurati nelle zone attorno al cantiere a cavallo tra il 1994 ed il 1995.**

Per trarre delle conclusioni va ricordato che le operazioni eseguite nel terreno presentano sempre una componente di rischio intrinseca legata al fatto che"non si sa bene cosa c'è sotto".

*Ciò comporta la* ***necessità di indagini preliminari*** *rivolte a rendere minimo il rischio e comporta anche, necessariamente,* l'adozione di coefficienti di sicurezza adeguati e tanto maggiori quanto maggiore è l'ignoranza dei luoghi, la entità dei lavori, la vulnerabilità del territorio.

Nel caso appena descritto, una serie numerosa di circostanze e scelte ha portato ad un progetto dei lavori prima ed una realizzazione poi che si sono rilevate inadeguate e che hanno obiettivamente causato fessure, danni, crolli locali e pericolo di crollo globale, e comunque una rilevante riduzione della sicurezza nei confronti di successivi possibili e probabili eventi statici, in numerosi edifici circostanti ed in alcuni edifici anche lontani ma caratterizzati da grande estensione geometrica e tipologia di materiali che li rendevano vulnerabili ai cedimenti differenziali.

Le indagini a posteriori eseguite mediante **interferometria satellitare** sulla "storia dei cedimenti" hanno evidenziato, al di là di ogni dubbio, un rapporto stretto di causalità, sia nel tempo che nello spazio, tra lo scavo (e relativo emungimento d'acqua) ed i cedimenti misurati nel terreno, cui conseguono i danni sulle strutture.

## Bibliografia

Ferretti A., Prati C., Rocca F., "Permanent Scatterers in SAR Interferometry" - IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, no. 1, January 2001.

Ferretti A., Prati C., Rocca F., "Non-linear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry" - IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, no. 5, September 2000.

A. Ferretti, C. Prati and F. Rocca, "Multibaseline InSAR DEM Reconstruction: the Wavelet Approach", - IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol.37, no. 2, March 1999.

Ferretti A., Prati C., Rocca F., “Monitoring Terrain Deformations Using Multi-Temporal SAR Images” Proceedings CEOS 1999 (Committee on Earth Observation Satellites) 26-29 October 1999 - Toulouse, France - http://www.estec.esa.nl/CONFANNOUN/99b02/99b02.html

Ferretti A., Prati C., Rocca F., “Non-Uniform Motion Monitoring Using the Permanent Scatterers Technique”, Proceedings of FRINGE 1999, 10-12 November 1999, Liège, Belgium. http://www.esa.int/fringe99/

Ferretti A., Prati C., Rocca F., “Measuring Subsidence with SAR Interferometry: Applications of the Permanent Scatterers Technique”, Proceedings of the Sixth International Symposium on Land Subsidence –Vol. II, SISOLS2000, 24–29 September 2000, Ravenna, Italy, pp. 67-79.

Ferretti A., Prati C., Rocca F., “Monitoring of Terrain Motion Using the PS Technique”, Proceedings EUSAR2000, 22-25 May 2000, München, Germany, pp. 115-118.

C. Colesanti, A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca, "Comparing GPS, Optical Levelling and Permanent Scatterers", Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS 2001, Sydney (Australia) 9-13 July 2001, Vol. 6, p. 2622-2624

C. Colesanti, A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca, " Monitoring Landslides and Tectonic Motion with the Permanent Scatterers Technique", accepted by Engineering Geology, Special Issue on Remote Sensing and Monitoring of Landslides, in press.