

# VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DI SCAVI IN FALDA SUI CEDIMENTI STRUTTURALI DI EDIFICI MEDIANTE UTILIZZO DI TECNICHE SATELLITARI SAR

A.FERRETTI<sup>1</sup>, G. FRANCHIONI<sup>2</sup>, L. JURINA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>TeleRilevamento Europa - TRE S.r.l. –Via V. Colonna,7– 20149 Milano ([alessandro.ferretti@treuropa.com](mailto:alessandro.ferretti@treuropa.com))

<sup>2</sup>Enel.Hydro S.p.A. div. ISMES – Via Pastrengo,9 – 24068 Seriate ([franchioni.giorgio@enel.it](mailto:franchioni.giorgio@enel.it))

<sup>3</sup>Politecnico di Milano, DIS – Piazza Leonardo da Vinci,32 – 20133 Milano ([lorenzo.jurina@jurina.it](mailto:lorenzo.jurina@jurina.it))

## SOMMARIO

L'articolo presenta i risultati di uno studio condotto nel 2002 sulle cause di alcuni rilevanti e diffusi dissesti strutturali avvenuti negli anni 1994-95 in numerosi edifici monumentali del centro storico di Rovigo.

Ben sette anni dopo lo svolgersi degli eventi è stato possibile fornire una dimostrazione ed una quantificazione spaziale e temporale del legame di causa-effetto tra lo scavo di un parcheggio sotterraneo ed i danni verificatisi in edifici ubicati a distanze anche ragguardevoli dallo scavo, grazie all'impiego di tecnologie di monitoraggio satellitare altamente innovative, la cui efficacia probante in ambito giudiziario è stata in questa occasione per la prima volta riconosciuta da pronunce giurisdizionali.

## ABSTRACT

The paper presents the results of a recent study of the causes of structural settlements observed in some monuments in the historical centre of the city of Rovigo in Italy.

The causes have been finally attributed to excavation works for the construction of an underground parking at a distance of about 100-150 m from the monuments.

The recognition of the causes has been possible also making use of satellite radar SAR data, processed through a highly innovative technique (Permanent Scatteres Technique - PSInSAR).

The probative effectiveness, from the legal viewpoint, of the results of the application of the satellite technology for the attribution of the damages responsibilities has been formally recognised for the first time in the present circumstance.

## 1. IL QUADRO DEI DISSESTI

Nel lasso di tempo di alcuni mesi a cavallo degli anni 1994-95, nel centro storico di Rovigo si sono verificati cedimenti strutturali diffusi che hanno interessato, oltre all'edilizia minore, anche alcune pregevoli opere monumentali: in particolare si trattava della Chiesa della Rotonda, della Chiesa di S. Francesco, con annessa Canonica, e della Chiesa del Cristo. La causa più plausibile sembrava potersi ricondurre ai lavori effettuati nel medesimo periodo per la realizzazione di un parcheggio sotterraneo, ma ragionevoli perplessità erano motivate dalla distanza di 100-150 metri tra la zona dello scavo e quella dei più lontani edifici lesionati, che appariva eccessiva.

Sette anni dopo, ossia nel 2002, all'interno del procedimento giudiziario per la attribuzione delle responsabilità penali nel delitto di disastro colposo per questi fatti, su incarico del Ministero per i Beni Ambientali e Culturali e della Soprintendenza ai Monumenti di Verona, che si era costituita parte civile, ed in collaborazione con l'Avvocatura di Stato, al prof. L.Jurina del Politecnico di Milano veniva affidato il compito di analizzare gli eventi, in qualità di perito della parte danneggiata.

Le analisi hanno preso inizio dal rilievo dei danni negli edifici monumentali di maggior pregio architettonico, a cui era specificamente indirizzato l'incarico.

- 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.

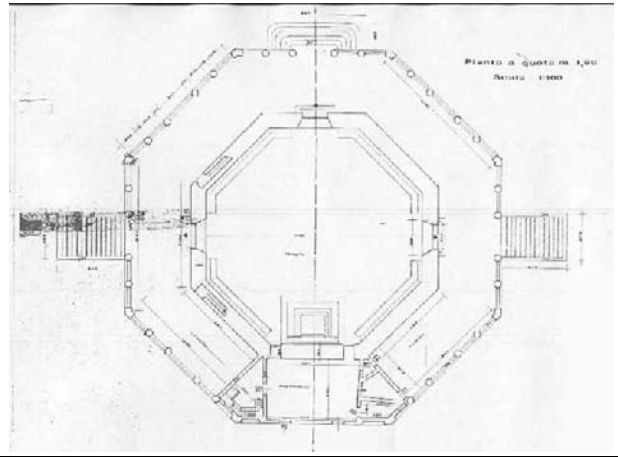


Figure 1 e 2 La chiesa della rotonda, prospetto e pianta

I rilievi effettuati (Figg. 3 a,b) 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.

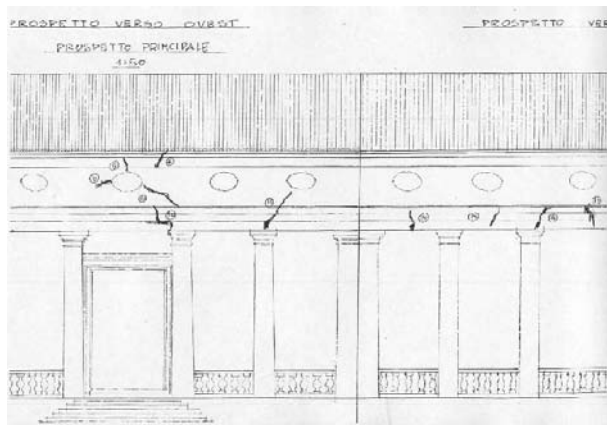


Figura 3 a,b Il rilievo del quadro fessurativo

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.

- La *Canonica* adiacente alla chiesa di S.Francesco è un edificio molto lungo e snello, costruito per accorpamenti successivi e di caratteristiche tipologiche più povere rispetto alla vicina chiesa (Fig. 4).

In questo edificio il quadro fessurativo strutturale si manifesta con grande evidenza (Fig. 5) e l'analisi ravvicinata delle superfici conferma che il fenomeno è di origine recente. 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.



**Figura 4** Una vista della chiesa di S.Francesco e della Canonica

**Figura 5** L'interno della Canonica

La presenza di giunti, fessure e separazioni impedisce questa forma di funzionamento e porta ad un forte incremento del rischio.

- Nella chiesa di S.Francesco (Figg. 6 e 7) le fessure interessano prevalentemente le murature in prossimità 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.



**Figure 6 e 7** L'interno della chiesa di S. Francesco: particolare di una delle lesioni che si sono riaperte

- La Chiesa del Cristo è stata oggetto di recenti interventi di consolidamento statico e di restauro delle superfici danneggiate, che oggi impediscono di analizzare direttamente il



degrado avvenuto. Anche qui le colonne della navata principale hanno presentato movimenti differenziali e, movendosi, hanno lesionato le soprastanti architravi e le soprastanti volte. Gli interventi di consolidamento effettuati, che non hanno potuto né voluto riportare “a piombo” le colonne, ancora oggi inclinate, hanno interessato le architravi e le volte che sono state fasciate con materiali fibrorinforzati (Figg. 8 a,b,c,d.).



*Figure 8 a,b,c,d I danni riscontrabili sulle volte ed il restauro strutturale realizzato utilizzando materiali fibrorinforzati*

Oltre ai monumenti appena presi in esame, una consistente porzione del tessuto edilizio minore, presente nel centro storico di Rovigo, ha subito lesioni di varia gravità.

## **2. LO STUDIO DELLE CAUSE DEI DISSESTI**

Il più probabile motivo dei dissesti è stato fin da subito individuato nell'esecuzione di uno scavo per la realizzazione di parcheggi sotterranei, in un'area baricentrica rispetto alla zona danneggiata ma alla ragguardevole distanza di circa 100-150 metri rispetto all'ubicazione dei monumenti sopra descritti (Figg. 9 a, b).

L'attribuzione derivava innanzitutto dalle testimonianze, che riferivano di un accentuarsi del quadro fessurativo in concomitanza con i lavori di scavo e il conseguente prolungato emungimento di acqua appunto nei mesi a cavallo tra il 1994 e il 1995.

A dire il vero, l'analisi degli elaborati progettuali e la verifica delle strutture realizzate sembravano avvallare, già da sole, la tesi che indicava lo scavo come responsabile dei fatti. Il progetto originario, infatti, si riferiva a due piani interrati e prevedeva una profondità dei diaframmi di 15 metri, cosa che avrebbe consentito di intercettare due strati argillosi impermeabili, e 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.



**Figure 9 a,b** Lo scavo del parcheggio interrato

In realtà in corso d'opera sono state apportate alcune sostanziali modifiche al progetto che hanno previsto, tra le altre cose, di aggiungere un ulteriore piano interrato e contemporaneamente di limitare i diaframmi ad una profondità di soli 10.8 metri, sufficiente appena ad intestarsi, senza neanche attraversarlo completamente, nel primo strato argilloso. In corso d'opera i tiranti sono stati sostituiti da meno efficienti puntellazioni ed inoltre la prevista 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 efficace impermeabilizzazione.

Date queste premesse ed altre considerazioni relative alle inappropriate modalità di esecuzione dei diaframmi bentonitici in c.a. (che non erano state collegati da un cordolo sommitale e che presentavano varchi nel perimetro) non stupisce che la profonda vasca dovesse essere mantenuta asciutta con un uso estensivo di speciali pompe (well-points), in funzione ininterrottamente per molti mesi per tenere basso il livello dell'acqua, e non stupisce che tale vasca si riempisse con grande rapidità nel momento in cui venivano spente. Tutto ciò ha causato effetti locali di scavamento (Fig. 10) in prossimità dei diaframmi e cedimenti diffusi del terreno sia nelle zone prossime al cantiere, come era prevedibile, sia in zone distanti, con una intensità del tutto inaspettata rispetto a possibili stime teoriche basate sulla teoria della filtrazione nel terreno.

Il prolungato e consistente abbassamento di circa 4 metri della falda freatica della città, ha modificato gli equilibri idrogeologici della zona ed è testimoniato anche dalle misurazioni periodiche effettuate dal Comune di Rovigo che indicano quantità molto rilevanti di acqua emunta dallo scavo e trasferita in fognatura, dell'ordine dei 1000 metri cubi al giorno.

Nella progettazione e realizzazione di questo progetto non si è tenuto in conto di una importante circostanza, ossia che l'intero scavo è ubicato all'interno di una zona di terreno particolarmente permeabile e poco addensato che interessa una parte del territorio di Rovigo e che è costituito dal "paleovallo" di un corso d'acqua che in passato attraversava quella zona.



**Figura 10** Scavernamenti e cedimenti diffusi del terreno nelle zone prossime al cantiere

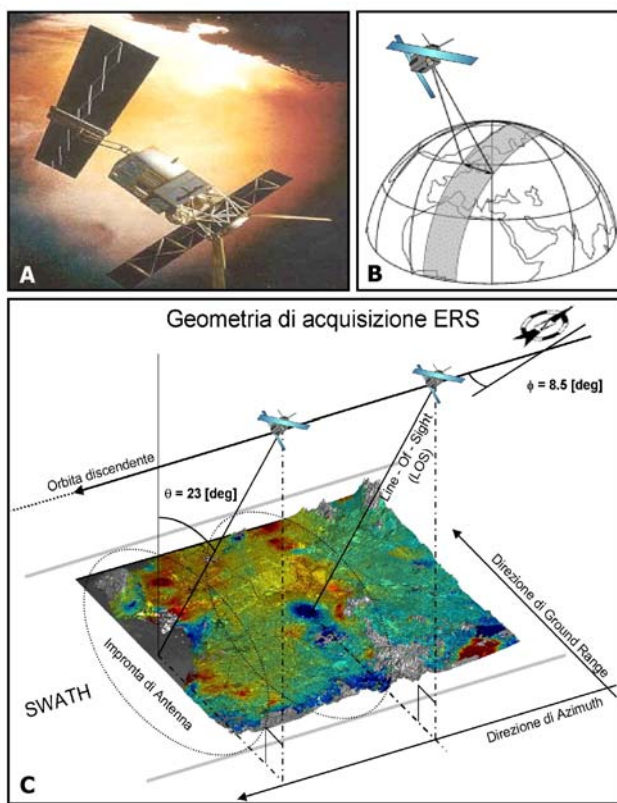
attorno allo scavo.

In sintesi, si è cercato se esisteva una modalità sperimentale per misurare, nel 2002, eventuali movimenti anomali del terreno nella zona in oggetto, avvenuti nel corso dei precedenti 10 anni.

### 3. LA TECNICA PSInSAR PER L'ELABORAZIONE DEI DATI SATELLITARI

Lo strumento è stato fornito da una tecnica sviluppata e brevettata recentemente dal Politecnico di Milano, denominata "Permanent Scatterers Technique - PSInSAR".

La Società TeleRilevamento Europa – TRE S.r.l, spin-off del Politecnico, detiene l'esclusiva per l'applicazione della tecnica di elaborazione, che costituisce un miglioramento sostanziale e ben collaudato delle tecniche classiche di interferometria satellitare SAR.



**Figura 11** Il satellite ERS. Geometria di acquisizione

A causa della elevata permeabilità orizzontale del terreno, il quantitativo di acqua da emungere è risultato molto superiore al previsto, con conseguente forte abbassamento della falda e con una estensione geometrica della zona interessata molto maggiore del previsto.

Per provare in modo definitivo la validità di quanto affermato, e quindi il rapporto di causa-effetto tra lo scavo ed i danni in zone anche distanti, nel corso della perizia ci si è proposto di "misurare" direttamente, anche se "a posteriori", sette anni dopo, i cedimenti verificatisi nel periodo 1994-1995

Il principio di funzionamento di un sistema radar è abbastanza semplice: un apparecchio trasmittente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica che incide su eventuali oggetti subendo un fenomeno di riflessione disordinata (diffusione, *scattering*). Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmittente, equipaggiata anche per la ricezione (Fig. 11).

Il ritardo temporale tra l'istante di trasmissione e quello di ricezione consente di valutare la distanza a cui si trovano i singoli bersagli radar, cioè di localizzare gli oggetti lungo la direzione della congiungente con l'emettitore, grazie alle caratteristiche di direttività dell'antenna utilizzata per trasmettere e ricevere il segnale radar.

Quanto più grande è l'antenna, tanto meglio viene localizzato il bersaglio.

Un modo per ottenere un'antenna equivalente di grandi dimensioni si realizza

attraverso la tecnologia SAR (Synthetic Aperture Radar), nella quale l'emettitore/ricevitore radar è fatto scorrere lungo un binario di dimensioni variabili da pochi metri a qualche decina di metri.

Oltre alla distanza del bersaglio, l'informazione del segnale di ritorno consente di valutare se il bersaglio si è spostato tra un istante e il successivo.

Questo tipo di informazione differenziale, estesa a tutti i punti dell'area illuminata, può essere rappresentato su mappe (interferogrammi) nelle quali la distribuzione delle frange consente di stimare i movimenti globali dell'area in studio.

Con l'interferometria SAR convenzionale, si possono apprezzare movimenti con un'accuratezza dell'ordine del centimetro; inoltre, in genere non è possibile effettuare stime puntuali, ma solo analisi d'insieme per identificare fenomeni macroscopici in essere.

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, ed in particolar modo le distorsioni introdotte dalle condizioni atmosferiche, agiscono come fattori di disturbo e devono essere stimati e rimossi dai dati.

I limiti dell'approccio dell'interferometria classica 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. Queste difficoltà sono state in gran parte risolte tramite la tecnica dei diffusori permanenti (*Permanent Scatterers*, PS), messa a punto e brevettata dai prof. F.Rocca e C.Prati e dall'ing. A.Ferretti nell'anno 1999 presso il Dipartimento di Elettronica del Politecnico di Milano, a seguito di oltre 15 anni di ricerca nel campo dell'interferometria. Questi punti coincidono fisicamente con manufatti presenti nell'area indagata, quali cornicioni, tralicci, tetti di cascine, blocchi di cemento, ecc. e possono anche corrispondere ad elementi naturali, come ad esempio rocce esposte.

L'approccio PS è basato sull'osservazione che un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, mostra caratteristiche ideali per misure accurate di spostamento. Per ricavare un'informazione utile è necessario che la densità spaziale di PS sia sufficientemente elevata (maggiore di 5-10 PS/km<sup>2</sup>), ed i moti dei bersagli radar siano sufficientemente lenti (velocità inferiori a 5-6 cm/anno).

L'insieme dei PS costituisce quindi, per l'area di indagine, una rete geodetica naturale utilizzabile sia per conoscere lo spostamento puntuale, sia per ricostruire, tramite tecniche di interpolazione, l'andamento globale dei movimenti superficiali.

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<sup>2</sup>. Tipicamente, utilizzando l'intero archivio storico ESA è possibile, in area urbana, monitorare il 70-80% degli edifici. 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.

Possibili impieghi di questo tipo di informazioni sono i seguenti:



- individuazione di aree soggette a subsidenza (a causa di prelievi di acqua, gas o idrocarburi dal sottosuolo)
- individuazione di 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.).

A titolo di esempio, si ricorda che la tecnica PS è stata recentemente utilizzata con successo per verificare “a posteriori” la stabilità dei palazzi circostanti agli edifici collassati a Camaiore (1995), Roma (1998) e a Foggia (1999).

I dati di riferimento sono forniti dai sensori SAR montati sui satelliti ERS-1 ed ERS-2 dell’Agenzia Spaziale Europea. 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. A differenza dei sistemi ottici, i sensori ERS-1/2 sono in grado di acquisire dati con qualsiasi condizione meteorologica e di notte. Le “fotografie” radar dell’area in studio sono riprese dai satelliti in due diverse condizioni di assetto: una corrispondente all’orbita ascendente e l’altra all’orbita discendente.

Proprio la ricchezza di dati disponibili nell’archivio ERS dell’ESA costituisce un ulteriore notevole vantaggio dell’interferometria SAR: 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.

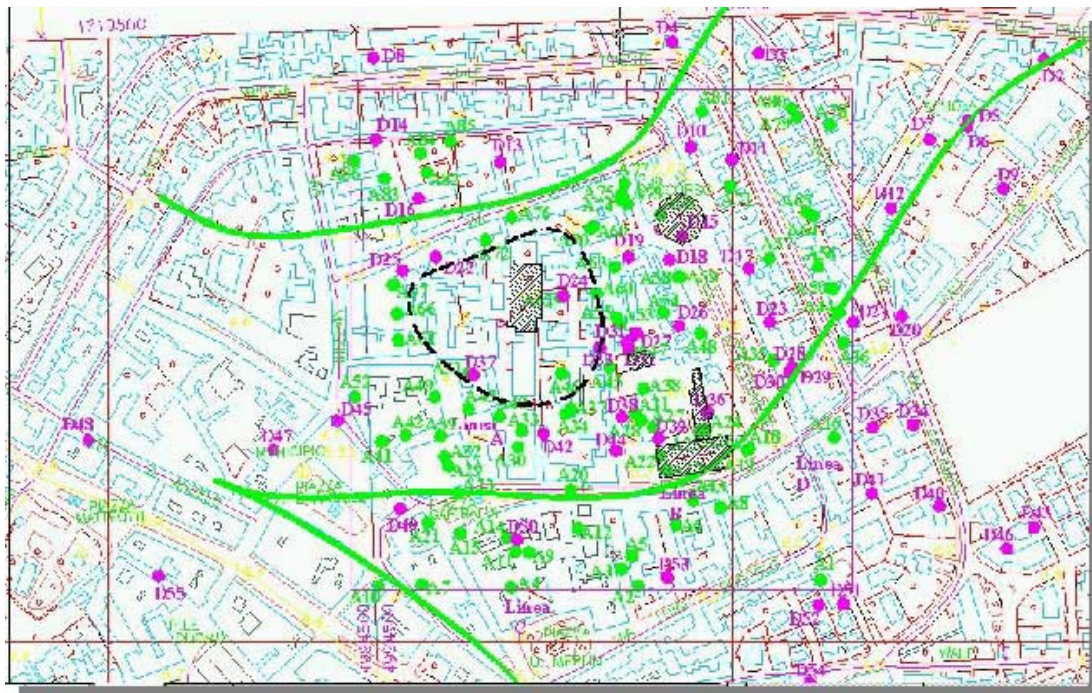
I limiti relativi alla tecnica PS consistono nella possibilità di apprezzare solo la deformazione lungo la direzione di LOS (Line Of Sight, ovvero la congiungente sensore-bersaglio a terra), cioè approssimativamente lungo la verticale, e nel fatto che per portare a termine con successo l’analisi PS è 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, fenomeni di deformazione con evoluzione particolarmente rapida (con velocità superiori a 1 cm/mese) possono dar luogo a problemi di ambiguità e complicare notevolmente l’interpretazione.

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.

#### **4. ANALISI DEI RISULTATI DELL’ELABORAZIONE DEI DATI SATELLITARI**

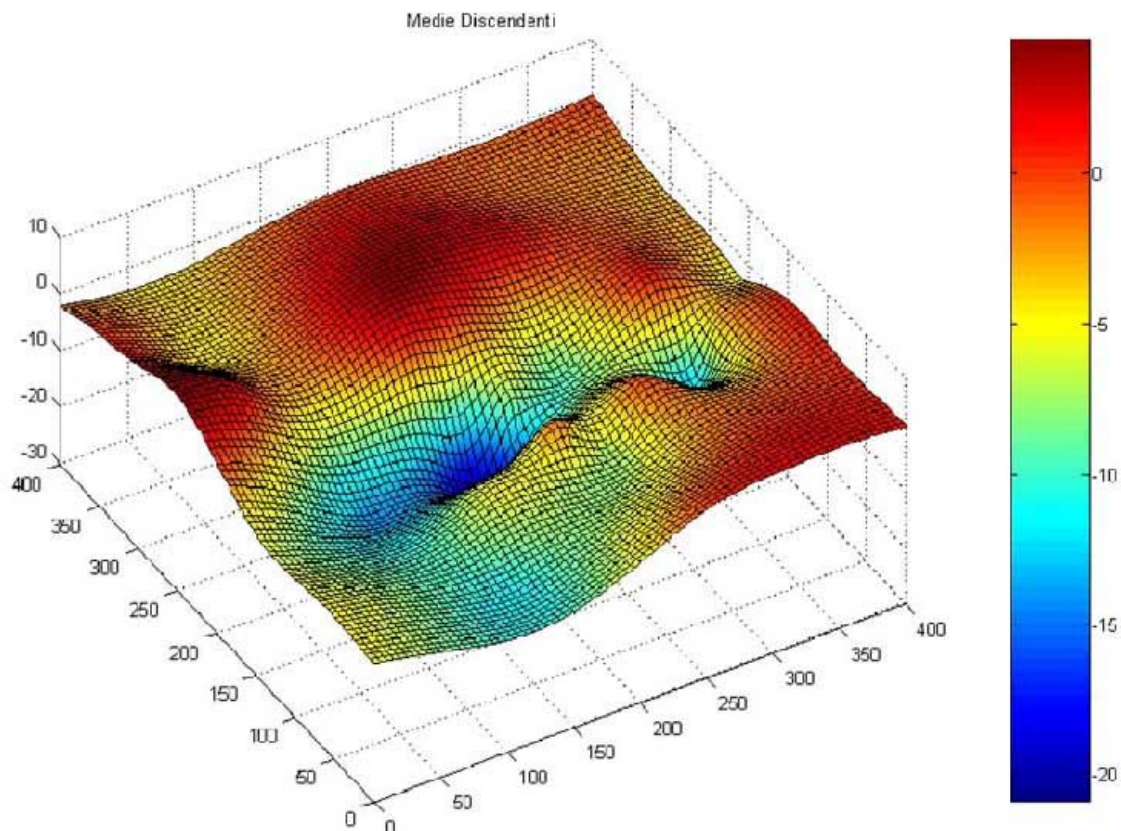
Tornando al caso dei cedimenti strutturali riscontrati nel centro storico di Rovigo, all’elaborazione preliminare dei dati acquisiti da ESA, svolta da TRE con la tecnica PSInSAR (Fig. 12), ha fatto seguito una rielaborazione ed un’analisi approfondita di congruenza dei dati stessi, eseguite da ENEL.HYDRO – ISMES, mirate alla conferma della validità del dato, soprattutto in relazione al problema dell’ambiguità, particolarmente insidioso nel caso specifico a causa della repentinità dei dissesti misurati. L’analisi di congruità ha tenuto in conto, naturalmente, le osservazioni puntuali dei fenomeni evidenziatisi, nonché le conoscenze sull’assetto idrogeologico della zona. I risultati di questa analisi sono presentati sotto forma di grafici delle serie temporali e di 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 (Fig. 13).





**Figura 12** Posizione e numerazione dei punti di misura “Ascendenti” e “Discendenti” e ubicazione del “paleoalveo”

L’esame conclusivo e l’interpretazione dei dati elaborati è stato condotto dal Prof. L.Jurina. Il confronto tra le immagini radar, realizzato in un numero notevole di punti (145 per la precisione, divisi nei due set separati di punti, (A) ascendenti e (D) discendenti), relativo a tutto il centro storico di Rovigo ed in particolare all’area attorno alla zona oggetto di analisi, ha fornito risultati diagnostici estremamente interessanti.





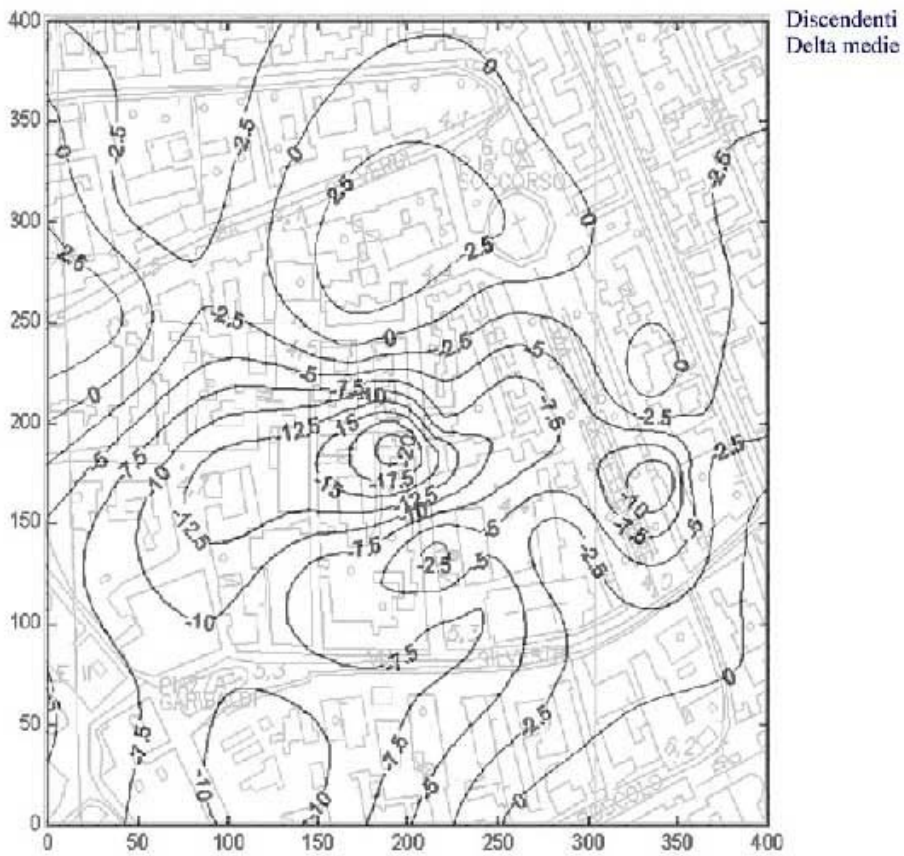
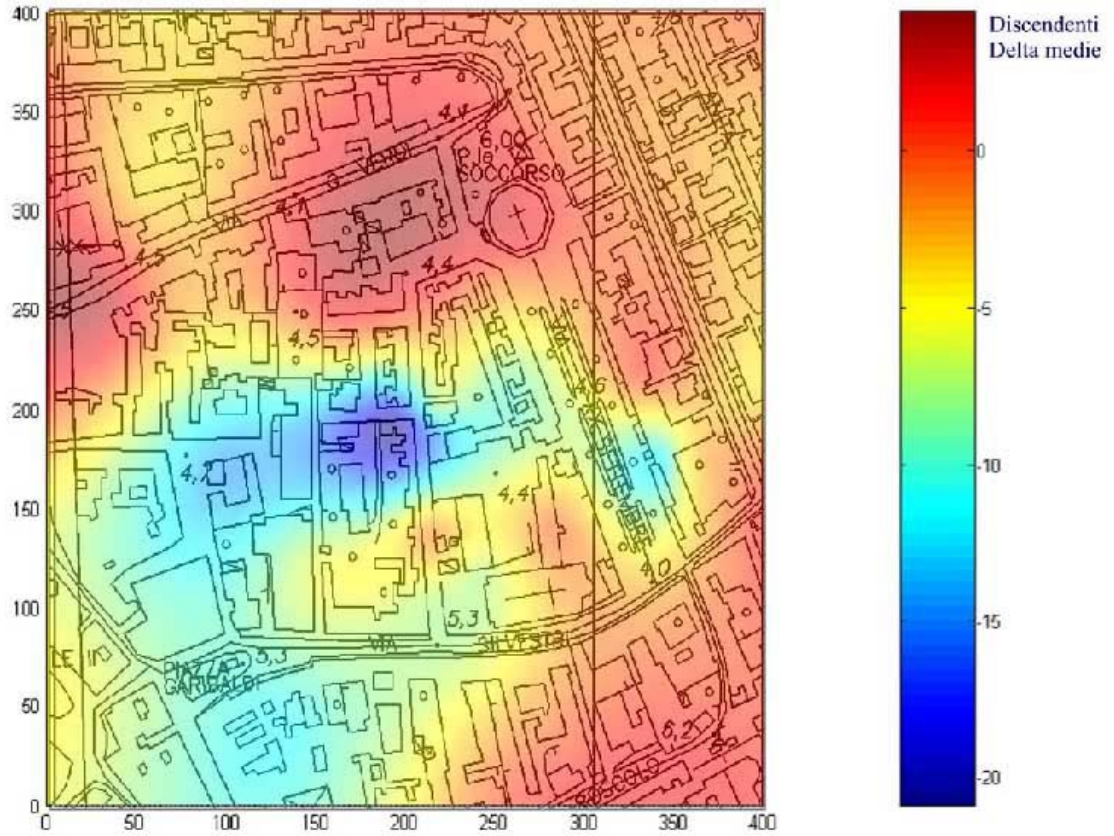


Figura 13 Contours e linee di livello degli incrementi di cedimento misurati nelle zone attorno al cantiere a cavallo tra il 1994 ed il 1995.

I principali risultati sono i seguenti:

- tutta la zona del centro 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 una traslazione rigida e sostanzialmente uniforme del terreno, tale da non provocare danni agli edifici. Questo fenomeno, peraltro già noto nella zona, è confermato appieno 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 (ossia una discontinuità anomala) che nelle zone più prossime arriva a superare i 2 centimetri, toccando il valore di 1,5 cm anche alla considerevole 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, ossia di breve durata, dell'altezza di falda è ininfluenza 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.

E' importante osservare da ultimo che l'estensione geometrica della zona allungata di 80 x 200 metri in cui sono presenti i maggiori cedimenti è sovrapponibile all'andamento di una zona di *paleoalveo* (Fig. 12) sperimentalmente verificabile, in cui le caratteristiche del terreno, diverse rispetto alle zone laterali in quanto meno addensate e quindi più permeabili, inducono un più esteso abbassamento della falda a seguito dell'emungimento. Di conseguenza si è prodotto un incremento della tensione efficace sul terreno sottostante a cui è seguito un cedimento del terreno stesso, di varia entità a seconda della natura locale del suolo.

## 5. CONCLUSIONI

L'impiego delle tecnologie satellitari SAR e della tecnica di elaborazione dei Permanent Scatterers, ha fornito elementi decisivi per il riconoscimento delle cause dei dissesti

strutturali riscontrati nel periodo 1994-95 nel centro storico di Rovigo. L'accuratezza dei rilievi puntuali e areali dei cedimenti e la disponibilità di un archivio storico di informazioni risalente al 1992 hanno avvalorato ed integrato le considerazioni ingegneristiche degli esperti, consentendo l'attribuzione dei danni osservati alle opere di scavo del parcheggio sotterraneo. Assieme a considerazioni di tipo meccanico e geotecnico, le misure satellitari utilizzate nella perizia di parte, predisposta per l'avv. G.Schiesaro dalla Avvocatura di Stato di Venezia, sono state fondamentali e riconosciute come probanti nel dispositivo della sentenza, favorevole ai danneggiati, emesso nel giugno 2002 dal giudice L.Miazzi del Tribunale di Rovigo.

Lo studio ha confermato l'estremo interesse della tecnologia e le sue enormi potenzialità nelle applicazioni a tutela del patrimonio monumentale e ambientale, sia per quanto riguarda la prevenzione ai fini della sicurezza, sia in relazione all'attribuzione delle responsabilità dei danni.

## 6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. *Jurina L.*, "Indagini interferometriche satellitari per la misurazione di movimenti del terreno causati da scavi in falda", 37° conv. ATE, "Ambienti interrati in presenza di falda", Padova, giugno 2002
2. *Jurina L.*, "A Rovigo il caso emblematico di un parcheggio interrato", Impermeabilità, vol 3, n.6, febbraio 2003, pp 2-5
3. *Ferretti A., Prati C., Rocca F.*, "Permanent Scatterers in SAR Interferometry" - IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, no. 1, January 2001.
4. *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.
5. *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.
6. *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.
7. *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

## 7. RINGRAZIAMENTI

Desideriamo ringraziare il Sovrintendente arch. R.Boschi, l'arch. L.Giavoni e il geom. V.Maduzzi della Soprintendenza per i Beni Architettonici e per il Paesaggio di Verona, per la generosa collaborazione prestata nella ricerca della documentazione storica, archivistica e fotografica, essenziale alla diagnosi, e per la perizia estimativa dei danni.

Articolo presentato al convegno:

**"Crolli e affidabilità delle strutture"**, Università di Napoli, Napoli 15-16 maggio 2003