

Progettare il sottosuolo, per un edificato sicuro
Milano, 6 maggio 2004

IL CASO EMBLEMATICO DI UN PARCHEGGIO INTERRATO: DIAGNOSI DI UN DISSESTO

Lorenzo Jurina
Politecnico di Milano
www.jurina.it

Alessandro Ferretti
Politecnico di Milano e Tele-Rilevamento Europa
www.treuropa.com

SOMMARIO

L'articolo presenta i risultati di uno studio condotto nel 2002 sulle cause di alcuni diffusi dissesti strutturali avvenuti negli anni 1994-95 in numerosi edifici monumentali del centro storico di Rovigo. Grazie all'impiego di tecnologie di monitoraggio satellitare altamente innovative, ben sette anni dopo lo svolgersi degli eventi è stato possibile fornire 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 stesso.

1. IL QUADRO DEI DISSESTI

A cavallo degli anni 1994-95, nel centro storico di Rovigo si sono verificati cedimenti strutturali diffusi che hanno interessato sia l'edilizia minore del centro storico, sia la Chiesa della Rotonda, quella di S. Francesco e quella del Cristo.

La causa più plausibile sembrava riconducibile ai lavori effettuati nel medesimo periodo per la realizzazione di un parcheggio sotterraneo, ma naturalmente gli anni intercorsi rendevano difficile stabilire un legame certo.

Nel 2002, nel corso del procedimento giudiziario per la attribuzione delle responsabilità penali nel delitto di disastro colposo per questi fatti, su incarico della Soprintendenza ai Monumenti di Verona, che si era costituita parte civile, ed in collaborazione con l'Avvocatura di Stato, all'autore veniva affidato il compito di analizzare gli eventi, come perito della parte danneggiata.

Sono stati esaminati in particolare tre edifici monumentali, iniziando dalla *chiesa della Rotonda* (Figg. 1 e 2) caratterizzata da una pianta poligonale e da uno snello perimetrale.

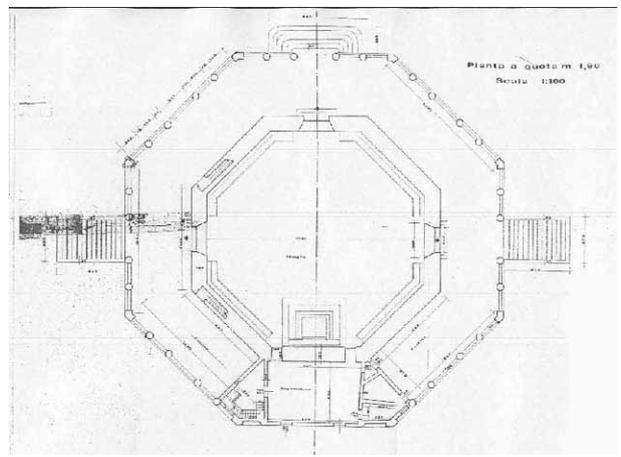


Figure 1 e 2. La chiesa della rotonda, prospetto e pianta

I rilievi del quadro fessurativo (Figg. 3 a,b) mostrano lesioni recenti in prossimità dell'appoggio dell'architrave continua posta al di sopra delle colonne, ed anche sulle pareti in muratura soprastanti i pilastri e nelle zone prossime alle finestre, ossia i punti più vulnerabili.

L'architrave, ruotando a causa del diverso movimento verticale delle colonne, ha danneggiato la muratura circostante, con rischio di crollo locale.

Numerose fessure sono presenti anche all'interno dell'edificio; in quelle zone tutta la muratura, di spessore superiore a 60 cm, è stata danneggiata dal fenomeno.

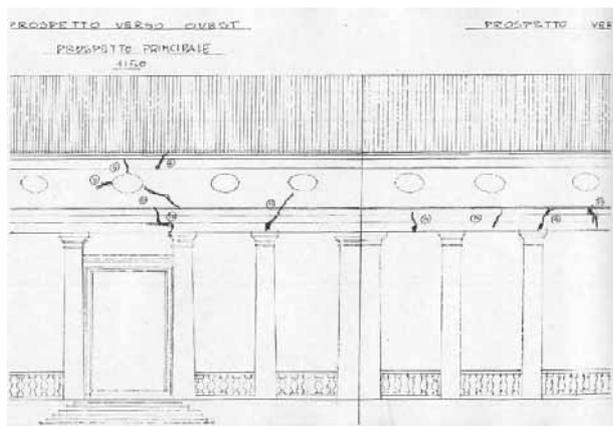


Figura 3 a, b. Il rilievo del quadro fessurativo

- Nella chiesa di S. Francesco (Figg. 4 e 5) le fessure interessano in particolare le murature in prossimità della facciata e le pareti più sollecitate dalla spinta divaricante degli archi e delle volte. Alcune delle fessure sigillate nel passato si sono riaperte recentemente, ma altre si sono formate.

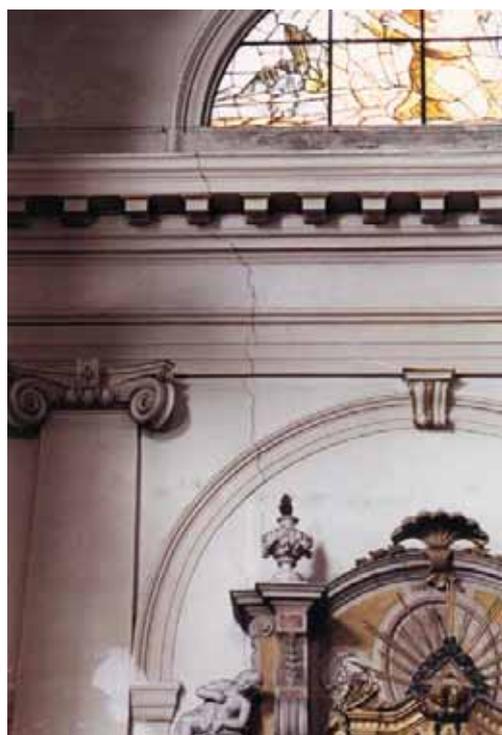


Figure 4 e 5. L'interno della chiesa di S. Francesco: particolare di una delle lesioni che si sono riaperte

La canonica adiacente alla chiesa è un edificio molto lungo e snello, costruito per accorpamenti successivi (Fig. 6) e questo fatto ha favorito il formarsi di un quadro fessurativo strutturale di origine recente. I cedimenti disomogenei del terreno di fondazione hanno provocato infatti rotture e distacchi tra le varie parti con una notevole diminuzione del grado di sicurezza dell'edificio, che, come sempre negli edifici storici in muratura, è affidato prevalentemente alla monoliticità dell'assieme.



Figura 6. Una vista della chiesa di S. Francesco e della Canonica

- Negli anni successivi all'evento oggetto della causa, la *Chiesa del Cristo* è stata sottoposta ad un intervento di consolidamento statico e di restauro delle superfici danneggiate che non hanno consentito l'analisi visiva diretta del degrado avvenuto. Da documentazioni fotografiche si è potuto tuttavia constatare che anche in questo edificio le colonne della navata principale hanno presentato movimenti differenziali che hanno lesionato le soprastanti architravi e le volte. Gli interventi di consolidamento si sono realizzati con fasciatura di tessuti fibrorinforzati, lasciando inalterati i "fuori piombo" delle colonne (Figg. 7 a,b,c,d).



Figure 7 a ,b, c, d. I danni riscontrabili sulle volte ed il restauro strutturale realizzato utilizzando materiali fibrorinforzati

2. LO STUDIO DELLE CAUSE DEI DISSESTI

Il motivo dei dissesti era facilmente riconducibile alla esecuzione dello scavo per la realizzazione del parcheggio sotterraneo, posto in una posizione baricentrica rispetto ai monumenti citati ma alla ragguardevole distanza di circa 100-150 metri da questi (Figg. 8 a, b).



Figure 8 a, b. Lo scavo del parcheggio interrato

Il prolungato emungimento di acqua nei mesi a cavallo tra il 1994 e il 1995 ed il concomitante sviluppo dei quadri fessurativi erano indicazioni di un rapporto causale molto verosimile. Si trattava tuttavia di provare e di quantificare questo legame.

Il progetto originario prevedeva due soli piani interrati, realizzati con diaframmi bentonitici di 15 metri di profondità, che avrebbero consentito di intercettare due strati argillosi impermeabili, con l'adozione di tiranti in sommità allo scopo di vincolare i pannelli di diaframma, nonché con l'esecuzione di un "tappo impermeabilizzante" di fondo realizzato mediante jet-grouting.

In corso d'opera il progetto è stato profondamente modificato aggiungendo un terzo piano interrato e limitando i diaframmi ad una profondità di soli 10.8 metri, intestati nel primo strato argilloso. Poco efficienti puntellazioni hanno sostituito i tiranti ed inoltre la prevista impermeabilizzazione del fondo, fortemente consigliabile per scavi in un ambiente dove la falda è particolarmente alta, è stata sostituita da un semplice trattamento del terreno di fondo scavo, impastato in loco con cemento.

A causa delle inappropriate modalità di esecuzione dei diaframmi in c.a. (non collegati da alcun cordolo sommitale), la profonda vasca si riempiva di acqua durante i lavori ed è stata mantenuta asciutta con l'uso di well-points, ininterrottamente in funzione per molti mesi, abbattendo il livello di falda da $-2,00$ a $-7,00$ metri. L'effetto immediato è stato quello di locali scavernamenti (Fig. 9) in prossimità dei diaframmi e nel lungo periodo quello di cedimenti diffusi del terreno sia nelle zone prossime che in zone distanti al cantiere, con una intensità del tutto inaspettata rispetto a possibili stime teoriche.



Figura 9. Scavernamenti e cedimenti diffusi del terreno nelle zone prossime al cantiere

Da un punto di vista giuridico restava tuttavia ancora aperta la domanda sulla effettiva possibilità di provare il rapporto di causa-effetto tra lo scavo ed i danni verificatisi, da esprimere quantitativamente nel tempo e nello spazio.

Lo scavo era ubicato in una zona di “paleoalveo” fluviale (fig.10), caratterizzato da una elevata permeabilità orizzontale, il che ha condotto ad emungere acqua in quantità molto superiore al previsto. Il prolungato e consistente abbassamento della falda freatica, a sua volta, ha prodotto un forte incremento della tensione efficace sul terreno sottostante a cui è seguito un cedimento del terreno di entità notevole ma variabile a seconda della natura locale del suolo e di eventuali inclusioni presenti, più o meno rigide.

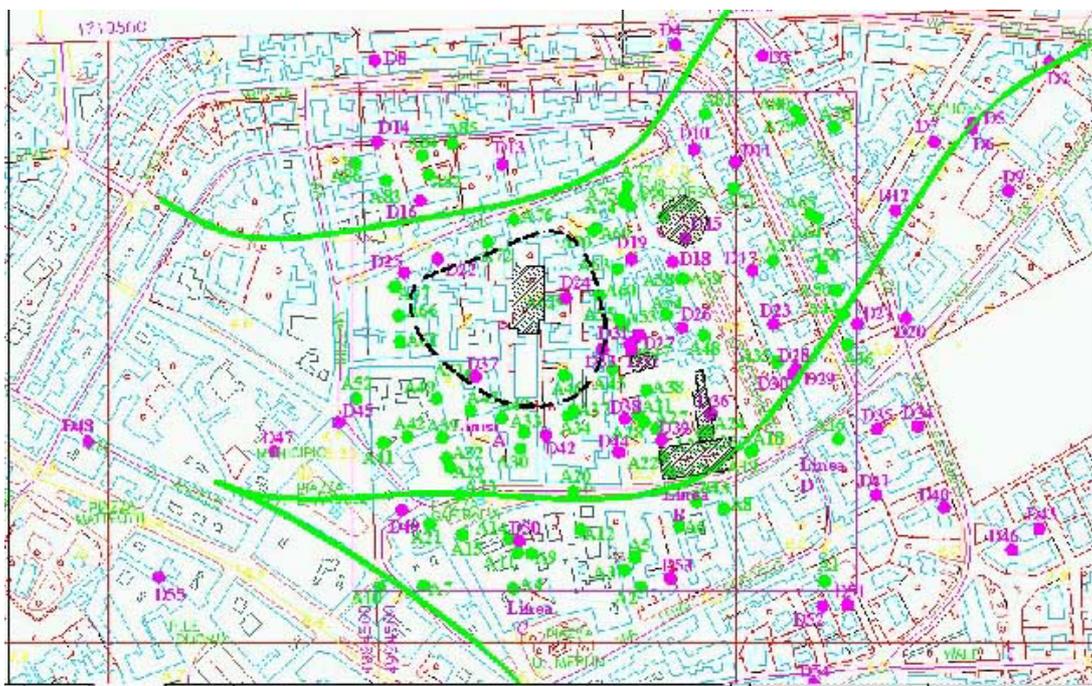


Figura 10. Posizione e numerazione dei punti di misura “Ascendenti” e “Discendenti” e ubicazione del “paleoalveo”

3. LA TECNICA “PSInSAR” PER L’ELABORAZIONE DEI DATI SATELLITARI

Lo strumento di indagine è stato fornito da una tecnica brevettata nel 1999 dai proff. Rocca e Prati e dall’ing. Ferretti del Politecnico di Milano, denominata “Permanent Scatterers Technique - PSInSAR”, che costituisce un miglioramento sostanziale e ben collaudato delle tecniche classiche di interferometria satellitare SAR (acronimo di Synthetic Aperture Radar).

Il principio di funzionamento si basa sulla lettura di onde elettromagnetiche inviate da un satellite e riflesse dalla superficie terrestre, in un fenomeno di riflessione disordinata (diffusione, *scattering*) in cui una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmittente, che è anche ricevente (Fig. 11).

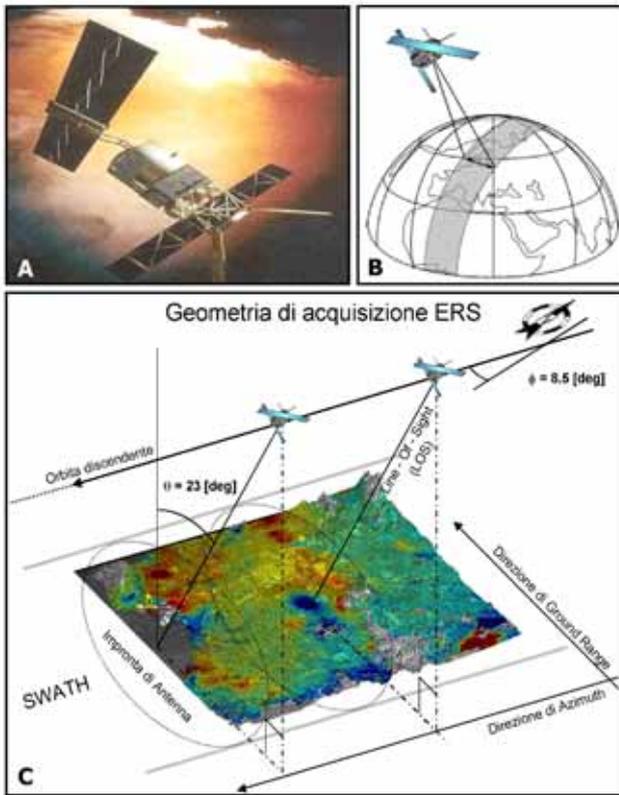


Figura 11 Il satellite ERS. Geometria di acquisizione

superare buona parte delle difficoltà legate alla individuazione dei bersagli radar ed ai disturbi causati dalle condizioni atmosferiche. Per ricavare un'informazione utile è necessario che la densità spaziale dei PS sia sufficientemente elevata (maggiore di 5-10 PS/km²), e che i moti dei bersagli radar siano sufficientemente lenti (velocità inferiori a 5-6 cm/anno). In aree ad elevata urbanizzazione, la densità spaziale di PS raggiunge valori molto alti, dell'ordine dei 100-400 PS/km² (Fig. 12) In corrispondenza di ogni singolo PS si ricava il trend medio di deformazione con precisioni comprese tra 0,1 e 1 mm/anno.

Le letture vengono effettuate su un sottoinsieme di bersagli radar (i PS appunto) già esistenti in loco (quali cornicioni, tralicci, blocchi di cemento o rocce esposte) particolarmente adatti a costituire elementi riflettenti dominanti nell'area di esame.

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 lungo la direzione della congiungente con l'emettitore, ma soprattutto, con una precisione ancora superiore, lo sfasamento del segnale di ritorno consente di valutare se il bersaglio si è spostato tra una rilevazione e la successiva (misura di moti differenziali).

Il risultato può essere rappresentato su mappe (interferogrammi) che consentono di evidenziare i movimenti differenziali dell'area in studio nell'ordine dei pochi millimetri.

La tecnica dei diffusori permanenti (*Permanent Scatterers*, PS) consente di

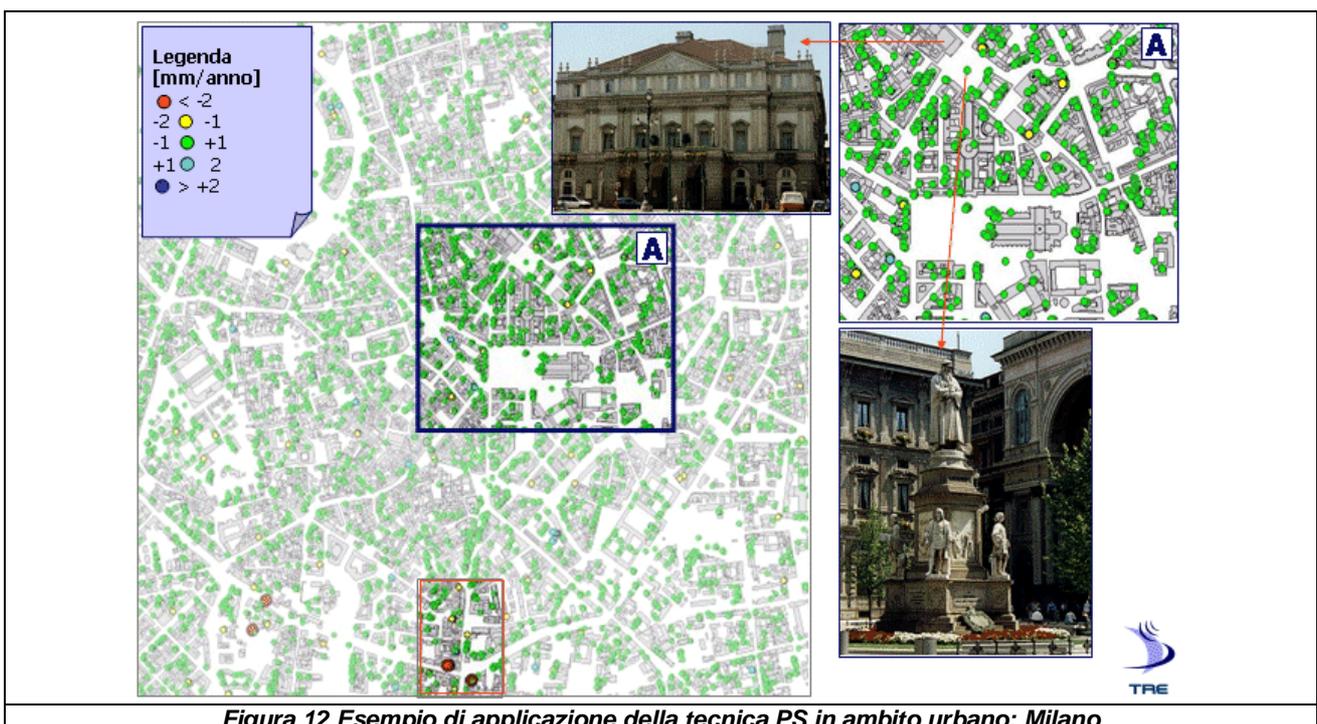


Figura 12 Esempio di applicazione della tecnica PS in ambito urbano: Milano

Per la singola misura, nei casi migliori, si arriva ad una precisione di 1-2 mm, comunque funzione del numero di immagini disponibili e della "qualità" del bersaglio. La cadenza delle acquisizioni è mensile (per l'esattezza ogni 35 giorni).

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 e verifica a posteriori degli scenari
- analisi di stabilità dei beni architettonici e degli edifici pubblici
- analisi di stabilità delle zone adiacenti a impianti sensibili (dighe, centrali, ecc.).

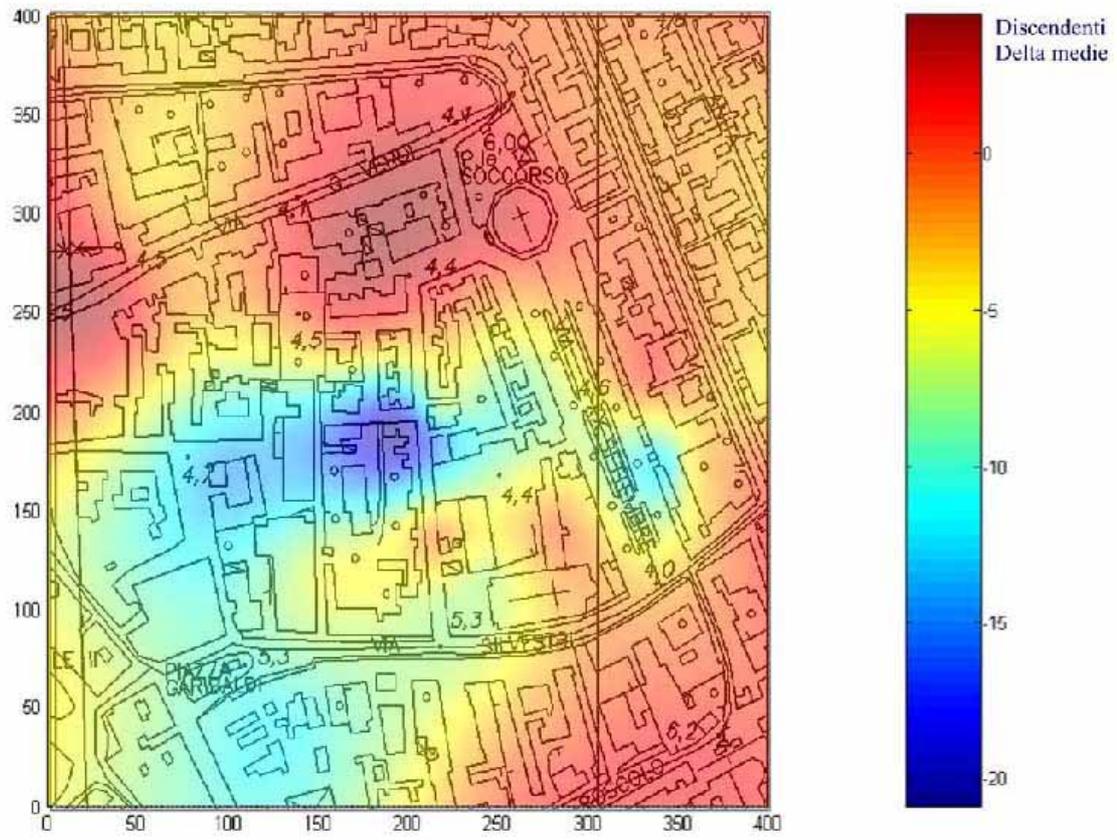
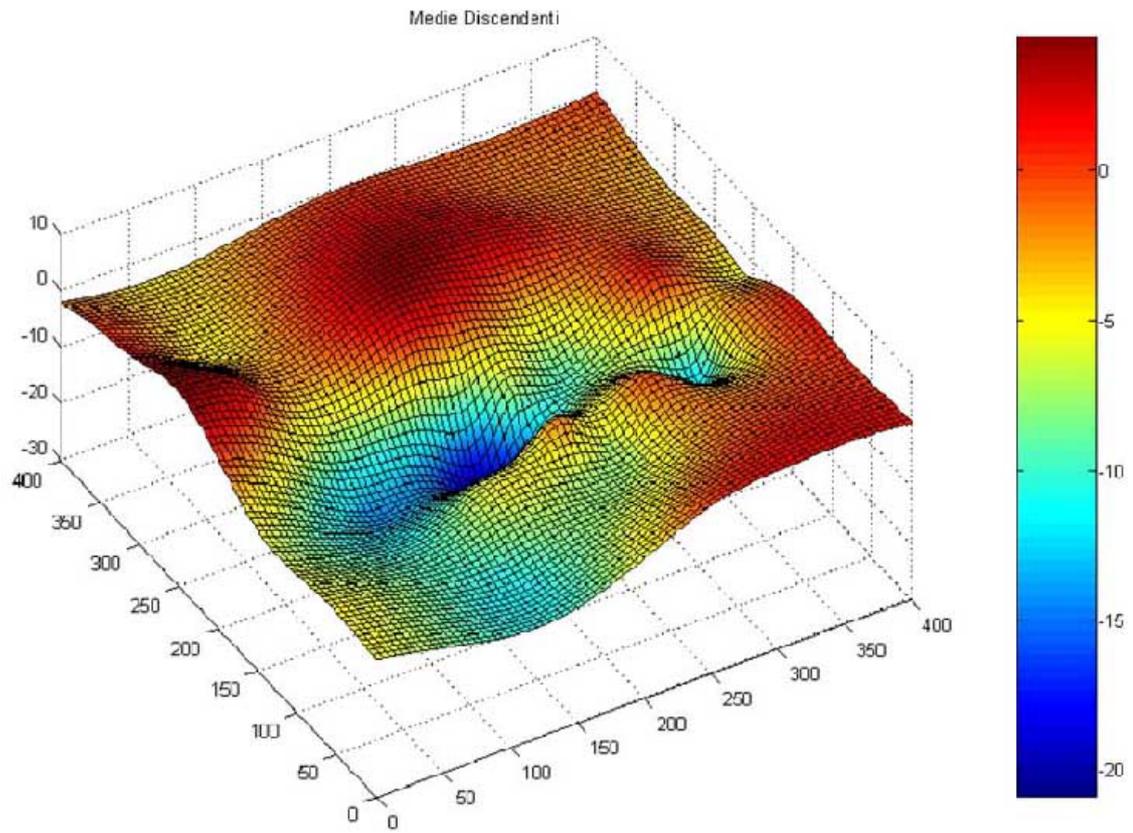
I dati di riferimento sono attualmente forniti dai sensori SAR montati sui satelliti ERS ed Envisat dell'Agenzia Spaziale Europea e sono disponibili serie storiche che interessano l'intero territorio nazionale. L'analisi PS, avendo a disposizione dati acquisiti a partire dal 1992, può pertanto *ricostruire la storia passata dell'area di interesse*, come nel caso di Rovigo, e non semplicemente fornire uno strumento di monitoraggio a partire da una certa data. Questa caratteristica si sta rivelando estremamente interessante anche per le imprese di assicurazione, per valutare in tempi estremamente rapidi dei fattori di rischio e valutare la veridicità di alcune rivendicazioni (*claim assessment*).

È da notare che, a differenza dei sistemi ottici, i sensori SAR sono in grado di acquisire immagini radar con qualsiasi condizione meteorologica ed anche di notte. I limiti della tecnica PS sono legati essenzialmente al fatto che non tutti gli edifici risultano monitorabili da satellite (ad oggi circa il 75% dei manufatti ha almeno un punto di misura) per fattori geometrici ed elettromagnetici. Le deformazioni non devono poi essere troppo rapide (le velocità devono essere inferiori a 5-6 cm/anno) in quanto potrebbero sorgere problemi di ambiguità legati alla lunghezza d'onda utilizzata.

La tecnica PS e la sua brevettazione ha portato l'Italia ai vertici della competizione internazionale nell'ambito del telerilevamento radar e ha spinto il Politecnico di Milano nel Marzo 2000 a creare una società (*spin-off* del Politecnico), Tele-Rilevamento Europa – T.R.E. (www.treuropa.com), volta ad offrire al pubblico prodotti e servizi legati allo sfruttamento del brevetto stesso. In un momento dove è sempre più importante trovare strade nuove per finanziare la ricerca italiana, che versa da anni in condizioni da molti giudicate assai critiche, l'opzione degli *spin-off* accademici potrebbe rivelarsi una strada percorribile, almeno nell'ambito delle ricerche applicate e dove la possibilità di arrivare a dei prodotti vendibili non è così remota.

4. ANALISI DEI RISULTATI DELL'ELABORAZIONE DEI DATI SATELLITARI

Tornando al caso del centro storico di Rovigo, l'elaborazione preliminare dei dati acquisiti da ESA (Fig. 10) svolta dallo staff di Tele-Rilevamento Europa, è stata affiancata da un'analisi di congruenza, eseguita da ENEL-HYDRO, mirata alla conferma della validità del dato. I risultati di questa analisi sono graficizzati in serie temporali e 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 (Figg. 13 a,b,c).



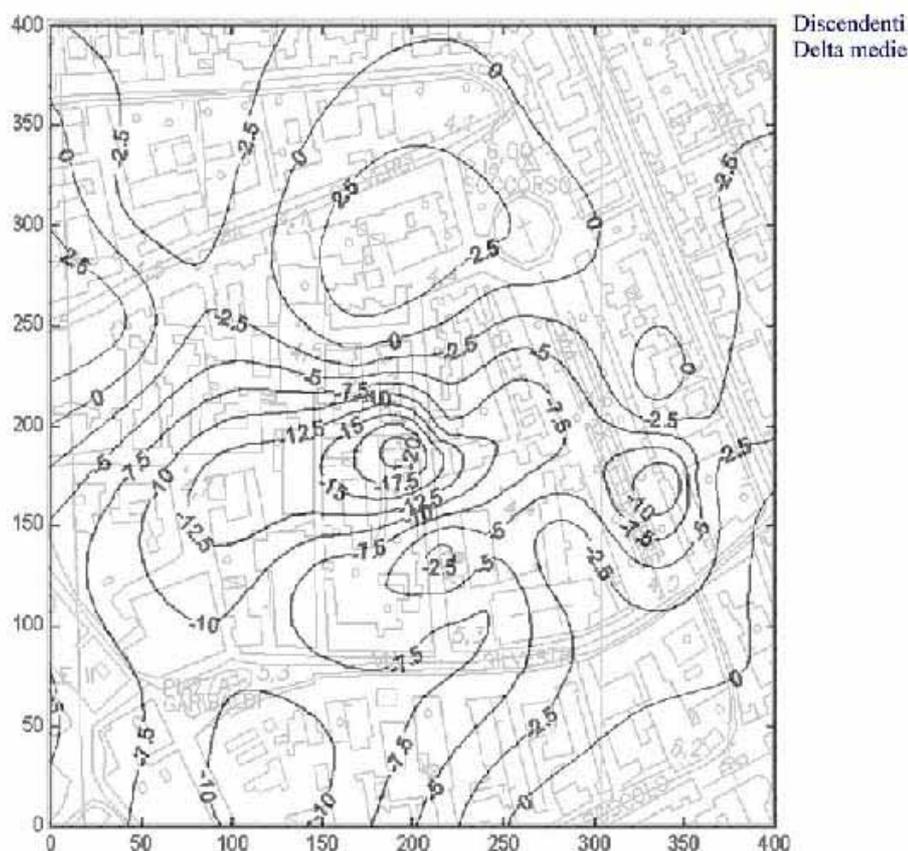


Figure 13 a, b, c . Contours e linee di livello degli incrementi di cedimento misurati nelle zone attorno al cantiere a cavallo tra il 1994 ed il 1995

L'esame conclusivo e l'interpretazione dei dati elaborati è stata condotta dal primo autore.

Il confronto tra le immagini radar, realizzato in 145 punti (divisi nei due set di punti, (A) ascendenti e (D) discendenti), relativo a tutto il centro storico di Rovigo ed in particolare all'area oggetto di analisi, ha fornito indicazioni diagnostiche quantitative estremamente interessanti.

I principali risultati sono i seguenti:

- tutta la zona del centro di Rovigo e dintorni è interessata da un fenomeno di subsidenza generalizzata il cui l'abbassamento medio è circa 1,2 mm all'anno; ciò provoca una traslazione rigida e uniforme del terreno, tale da non causare danni agli edifici. Le misure interferometriche SAR hanno quindi confermato con grande accuratezza un dato già noto, che si evidenzia lungo tutto il periodo esaminato, pari a circa 10 anni.
- oltre al fenomeno della subsidenza, 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 un periodo a cavallo tra il 1994 e il 1995, e solo in quel periodo, in una zona piuttosto allungata, che si estende in direzione Est-Ovest attorno al cantiere, di dimensioni in pianta pari a circa 80 x 200 metri, si osserva un brusco incremento

dei cedimenti che nelle zone più vicine arriva a superare i 2 centimetri, toccando il valore di 1,5 cm anche alla considerevole distanza di 100 metri dalla zona di scavo.

- l'entità dei cedimenti del terreno ottenuta sia a partire dal gruppo delle misure (A) ascendenti che da quelle (D) discendenti è sostanzialmente analoga, per tutte le diverse postazioni della zona di interesse, confermando la validità dei risultati ottenuti.
- la distribuzione spaziale dei cedimenti presenta dei picchi e delle discontinuità, causati dalle caratteristiche locali non omogenee del suolo. Sono proprio questi cedimenti differenziali delle fondazioni che hanno provocato le lesioni negli edifici.
- le variazioni stagionali della falda, sia quelle degli anni precedenti che quelle successive ai lavori di scavo non hanno minimamente influenzato l'andamento dei cedimenti del terreno.
- gli effetti del cedimento avvenuto a cavallo tra il 1994 e il 1995 sono irreversibili. L'andamento non torna ad approssimarsi, neppure asintoticamente, a quello precedente gli scavi.

5. CONCLUSIONI

L'impiego delle tecnologie satellitari SAR e in particolare della tecnica dei Permanent Scatterers, recentemente brevettata dal Politecnico di Milano, ha fornito, sette anni dopo il verificarsi dei danni, elementi quantitativi decisivi per il riconoscimento delle cause dei dissesti strutturali riscontrati nel centro storico di Rovigo. La accuratezza dei rilievi puntuali di cedimento, dimostrata sperimentalmente, e la disponibilità di un archivio storico di informazioni risalente al 1992 hanno avvalorato ed integrato le considerazioni tecniche degli esperti interpellati, basate sulla morfologia dei danni, consentendone la attribuzione alle opere di scavo del parcheggio sotterraneo.

Assieme a considerazioni di tipo meccanico e geotecnico, pertanto, le misure satellitari utilizzate nella perizia di parte, predisposta per Avvocatura di Stato di Venezia, sono state fondamentali e riconosciute come probanti nel dispositivo della sentenza, favorevole ai danneggiati, emesso nel giugno 2002 dal Tribunale di Rovigo.

Gli autori ritengono che in futuro le tecniche radar satellitari rivestiranno un ruolo sempre più importante sia nella stima dei fattori di rischio (almeno in ambito urbano), sia nella verifica a posteriori di quanto realmente accaduto in una certa area. Non è superfluo, infine, mettere in evidenza l'importanza di un dato come questo per tutti gli operatori coinvolti nei lavori legati alla costruzione dei parcheggi sotterranei nelle principali città italiane nei prossimi anni.

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. *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.
2. *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.
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. *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
5. *Ferretti A. Franchioni G., Jurina L.*, "Valutazione degli effetti di scavi in falda sui cedimenti strutturali di edifici mediante utilizzo di tecniche satellitari SAR", 2° Convegno "Crolli e affidabilità nelle strutture", Napoli, 15-16 maggio 2003.