



tecniche satellitari SAR

L'analisi "a posteriori" dell'entità dei cedimenti degli edifici

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

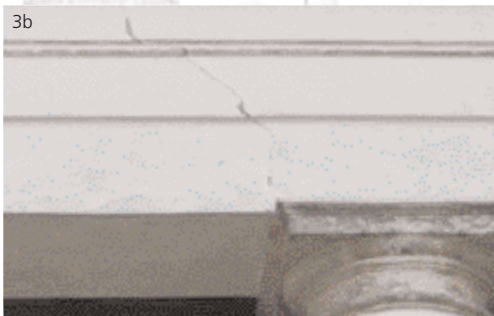
A cavallo degli anni 1994-95, nel centro storico di Rovigo si sono verificati cedimenti strutturali diffusi che hanno interessato sia l'edilizia minore del centro storico, sia la Chiesa della Rotonda, quella di S. Francesco e quella del Cristo. La causa più plausibile sembrava riconducibile ai lavori 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 l'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** (figure 1 e 2) caratterizzata da una pianta poligonale e da uno snello perimetrale. I rilievi del quadro fessurativo (figure 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'edifi-

cio; in quelle zone tutta la muratura, di spessore superiore a 60 cm, è stata danneggiata dal fenomeno.

Nella chiesa di **S. Francesco** (figure 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. La canonica adiacente alla chiesa è un edificio molto lungo e snello, costruito per accorpamenti successivi (figura 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'insieme. 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 (figura 7 a/d).



LE CAUSE DEI DISSESTI. LO STUDIO

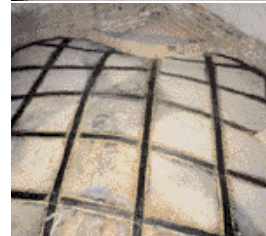
Il motivo dei dissesti era facilmente riconducibile all'esecuzione dello scavo per la realizzazione del parcheggio sotterraneo, posto in una posizione baricentrica rispetto ai monumenti citati ma alla ragguardevole distanza di circa 100-150 metri da questi (figure 8 a,b).

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

7a
7b
7c
7d

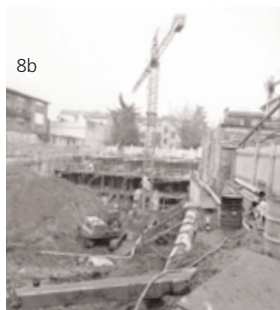


hanno sostituito i tiranti ed inoltre la prevista impermeabilizzazione del fondo, fortemente consigliabile per scavi in un ambiente dove la falda è particolarmente alta, è stata sostituita da un semplice trattamento del terreno di fondo scavo, impastato in loco con cemento.



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 (figura 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.

Lo scavo era ubicato in una zona di "paleoalveo" fluviale (figura 10), caratterizzato da un'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.

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.

NELLE IMMAGINI

1, 3 a,b. Chiesa della Rotonda. Prospetto e rilievo del quadro fessurativo. 4, 5, 6 (in apertura). Chiesa di S. Francesco: vista dell'esterno e particolari di una delle lesioni che si sono riaperte. 7 a, b, c, d. I danni riscontrabili sulle volte ed il restauro strutturale realizzato utilizzando materiali fibrorinforzati. 8 a, b. Lo scavo del parcheggio interrato.

■ 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.

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 (figura 11).

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

La tecnica dei diffusori permanenti (Permanent Scatterers, PS) consente di superare buona parte delle difficoltà legate all'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. In corrispondenza di ogni singolo PS si ricava il trend medio di deformazione con accuratezza compresa tra 0,1 e 1 mm/anno.

Per la singola misura, nei casi migliori, si arriva ad una accuratezza di 1-2 mm, comunque funzione del numero di immagini e della "qualità" del bersaglio.

Possibili impieghi di questo tipo di informazioni sono:

- l'individuazione di aree soggette a subsidenza (a causa di prelievi d'acqua, gas o idrocarburi dal sottosuolo);
- l'individuazione di aree soggette a fenomeni franosi e di instabilità di versante (in aree non troppo vegetate e per moti sufficientemente lenti);
- il monitoraggio di zone vulcaniche;
- l'analisi dei moti in prossimità di faglie sismiche;
- l'analisi di stabilità dei fabbricati;
- l'analisi di stabilità di beni architettonici ed edifici pubblici;
- l'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-1 ed ERS-2 dell'Agenzia Spaziale Europea e sono disponibili serie storiche che interessano gran parte del territorio nazionale. Va sottolineato che l'analisi PS, avendo a disposizione dati acquisiti a partire del 1992, può



ricostruire la storia passata dell'area di interesse, come nel caso di Rovigo.

A differenza dei sistemi ottici, i sensori ERS-1/2 sono in grado di acquisire "fotografie" radar dell'area in studio con qualsiasi condizione meteorologica ed anche di notte.

I limiti relativi alla tecnica PS consistono nella possibilità di apprezzare solo la deformazione lungo la direzione della congiungente sensore-bersaglio a terra, cioè approssimativamente lungo la verticale, e nel fatto che è necessaria la presenza di una densità sufficiente di diffusori permanenti e che le deformazioni non devono essere particolarmente rapide (velocità inferiori a 1 cm/mese) in quanto potrebbero sorgere problemi di ambiguità legati alla lunghezza d'onda utilizzata.

■ Tornando al caso del centro storico di Rovigo, l'elaborazione preliminare dei dati acquisiti da ESA (figura 10), 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. L'esame conclusivo e l'interpretazione dei dati elaborati sono state condotte dall'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 abbassamento medio è circa 1,2 mm/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, di 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 picchi e di-

scontinuità, 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 '94 e il

'95 sono irreversibili. L'andamento non torna ad approssimarsi, neppure asintoticamente, a quello precedente gli scavi.

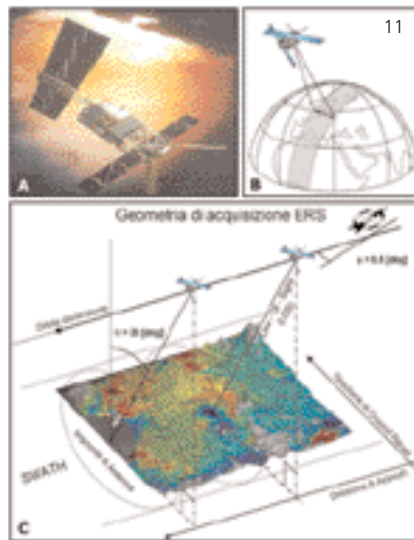
CONCLUSIONI

L'impiego delle tecnologie satellitari SAR e della tecnica di elaborazione dei Permanent Scatterers 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. L'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.

NELLE IMMAGINI

- 9. Scavernamenti e cedimenti diffusi del terreno nelle zone prossime al cantiere. 10. Posizione e numerazione dei punti di misura "Ascendenti" e "Discendenti" e ubicazione del "paleoalveo. 11. Il satellite ERS. Geometria di acquisizione.



BIBLIOGRAFIA

[1] Ferretti A., Prati C., Rocca F., "Measuring Subsidence with SAR Interferometry: Applications of the Permanent Scatterers Technique", Proceedings of the 6° Int. Symposium on Land Subsidence - Vol. II, SI-SOLS2000, 24-29 settembre 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° convegno 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.