

## MONITORAGGIO STRUTTURALE INTEGRATO IN AMBIENTE URBANO

Stefano CALCATERRA, Claudio CESI, Marola CORSETTI, Amedeo LUCIDI,  
Domenico MATARAZZO, Daniela Maria Antonia NICEFORO, Claudio PULSINELLI,  
Luca Maria PUZZILLI, Francesco VULLO

ISPRA, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Via Curtatone, 3,  
Tel. (+39) 0650071, claudio.cesi@apat.it

### Riassunto

Il Programma Urbanistico di Sostituzione Edilizia attualmente in corso nel quartiere di Giustiniano Imperatore in Roma rappresenta uno tra i primi e più ampi esempi di demolizione e ricostruzione di una parte di città in Europa. Il Servizio Geofisica di ISPRA (ex APAT - Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici), nell'ambito della collaborazione con il Comune di Roma e l'Università Roma Tre –Dipartimento di Scienze Geologiche, ha progettato e realizzato una rete di monitoraggio delle deformazioni plano-altimetriche delle opere di contenimento degli scavi e degli edifici circostanti, nonché delle deformazioni del suolo nelle aree limitrofe al cantiere. L'architettura del sistema di monitoraggio si sta dimostrando adeguata all'obiettivo prefissato del controllo degli spostamenti plano-altimetrici, sebbene questi risultino inferiori a quelli attesi e non dissimili da quelli indotti dalla subsidenza in atto, caratterizzata da velocità superiori ai 10 mm/anno. L'utilizzo integrato di sistemi di controllo a differente grado di precisione ha fornito risultati incoraggianti per l'implementazione di reti di monitoraggio in corso d'opera, in aree affette da analoghe problematiche geologiche in contesti fortemente urbanizzati.

### Abstract

The Urbanistic Plan for Urban Replacement in the Giustiniano Imperatore district in Rome, still under way represents one of the first and widest example of demolition and reconstruction of an urban area in Europe. The Geophysical Service of ISPRA (ex APAT - Italian Environment Protection and Technical Services Agency) in partnership with Roma Tre University and Municipality of Rome, has designed the monitoring network to take under control structures (buildings) and terrain deformations in the surrounding areas of construction-site during work. The network architecture allows to monitoring terrain and structures deformations, even though the real deformations are lower than expected and very close to those induced on buildings by natural subsidence, characterized by velocity even much higher than 10 mm/year. The monitoring network devotes a great deal of attention to the link between systems with different degree of approximation, providing encouraging results in order to design monitoring network in highly urbanized areas affected by similar geological hazard.

### Introduzione

Il quartiere di Giustiniano Imperatore dal 2004 è interessato da un Programma Urbanistico di Sostituzione Edilizia e di riqualificazione urbana considerato uno dei primi e più ampi esempi di demolizione e ricostruzione di una parte di città in Europa. L'area è nota storicamente per le condizioni di precaria stabilità di molti edifici ("i palazzi storti") realizzati nel corso degli anni 50' e 60' su terreni di fondazione con caratteristiche molto scadenti. I cedimenti del terreno provocarono sin dall'inizio seri problemi per la edificazione e ancora oggi, non essendo completamente esauriti, inducono la rotazione rigida dei corpi di fabbrica che risultano affetti da evidenti fuori-piombo delle murature perimetrali (alcune decine di cm). A partire dal 2001 nell'area sono stati demoliti alcuni

edifici pericolanti con la conseguente insorgenza di una emergenza abitativa cui fare fronte, oltre alla necessità di riqualificazione dell'intero quartiere. L'Amministrazione Comunale di Roma attraverso il Dipartimento VI -U.O. 11 "Interventi di Qualità", successivamente alle opere di demolizione degli edifici pericolanti e alla progettazione del 1° comparto di sostituzione edilizia, ha incaricato il Dipartimento di Scienze Geologiche di Roma Tre e il Servizio Geofisica dell'ISPRA di progettare e rendere operativa una rete di monitoraggio integrata, mirata alla valutazione di eventuali modifiche indotte sul sistema suolo e sul tessuto urbano dalla realizzazione delle opere in progetto, con particolare riferimento alla salvaguardia delle strutture presenti sul territorio. La rete di monitoraggio, progettata congiuntamente dai due Enti, è stata concepita in modo da garantire la sinergia tra le rispettive competenze al fine di giungere al rapido confronto dei parametri ottenuti dai vari sistemi di misura di cui si compone la rete, il cui impianto risponde all'esigenza di durata almeno biennale, con possibilità di adeguamento della frequenza delle misure agli scenari che si vengono a determinare di volta in volta nel corso del progetto edilizio. Per tale motivo lo sforzo è stato prioritariamente indirizzato all'automazione dei sistemi, ricercando le soluzioni per letture strumentali in automatico ed in telemisura, con controllo remoto dei sistemi e possibilità di analisi in tempo quasi reale dei dati rilevati. Il monitoraggio si colloca nell'alveo di una filosofia che si è andata sempre più consolidando nell'ultimo decennio, sostenuta anche da normative nazionali tendenti a recepire direttive europee, che individua nel monitoraggio uno strumento basilare per assicurare sia la fase propria delle indagini conoscitive per lo studio e l'accertamento dei fenomeni, sia quella di sorveglianza e allarme, per finire con il monitoraggio quale strumento di verifica dell'effettivo conseguimento degli obiettivi di salvaguardia e/o risanamento.

### **Inquadramento geoambientale**

L'area in esame corrisponde indicativamente al settore centrale della valle del Fosso di Grotta Perfetta. L'antica "Marrana" occupava fino agli inizi del secolo XIX quello che oggi corrisponde grossolanamente al settore compreso tra la Cristoforo Colombo ad Ovest ed il Tevere -Valco San Paolo, con un decorso coincidente pressappoco con quello di Viale Giustiniano Imperatore. Oggi il corso d'acqua è incanalato a partire dal Piazzale del Caravaggio in un collettore primario che, correndo sotto il Viale di Giustiniano Imperatore, ricalca sostanzialmente l'andamento dell'antico alveo tributario fino al fiume Tevere. A cavallo degli anni '40 e '50 tutta la zona di Viale Giustiniano conosce un periodo di intensissima urbanizzazione non programmata, che ne modifica sostanzialmente l'assetto idrogeomorfologico: la depressione valliva occupata dai sedimenti alluvionali viene rapidamente e definitivamente colmata da alluvioni e soprattutto da riporti, inclusi materiali provenienti da demolizioni (Campolunghi et al., 2007), con progressivi apporti di materiale che arrivano fino a 5-6 metri di spessore. L'urbanizzazione conosce fin dall'inizio problemi di staticità dei fabbricati, sia per la inadeguatezza delle tecniche costruttive e fondali, quali pali flottanti o fondazioni dirette, sia per l'elevata deformabilità dei terreni alluvionali. Gli studi più recenti hanno messo in relazione il fenomeno di subsidenza dei terreni olocenici con il loro basso indice di plasticità, con la sensibilità medio-elevata e con elevati valori di indice dei vuoti ( $e=2.4$ ) che li caratterizza, evidenziando inoltre la grande influenza della componente organica nel loro comportamento geomeccanico (Funicello et al., 2004; Campolunghi et al., 2007).

### **Il monitoraggio del "sistema urbano"**

Il Sistema di monitoraggio di competenza di ISPRA è stato progettato ed è attualmente gestito dal Servizio Geofisica sulla base delle conoscenze sviluppate nel corso di precedenti esperienze (Bonci et al., 2003). Il sistema, realizzato in un'area urbana soggetta a fenomeni di dissesto in atto, si pone quale obiettivo la rilevazione dei movimenti plano-altimetrici indotti dalle attività in progresso sulle strutture di contenimento degli scavi per la realizzazione delle fondazioni e dei piani interrati dei nuovi edifici, sul suolo circostante l'area d'intervento nonché sugli edifici limitrofi all'area di cantiere. Il monitoraggio si è costantemente adeguato all'avanzamento dei lavori di costruzione, le cui fasi realizzative, una volta conseguite, hanno modificato la situazione logistica limitando parzialmente o impedendo totalmente l'operatività di alcuni segmenti del monitoraggio stesso. Il Sistema di monitoraggio plano-altimetrico risulta organizzato in tre segmenti:

Rete di livellazione di alta precisione: segmento finalizzato alla rilevazione dei movimenti verticali del suolo e degli edifici nell'area immediatamente circostante quella d'intervento. La livellazione viene eseguita con autolivello Leica wild Na3000 e stadiе in nastro INVAR con codice a barre. I capisaldi sono stati collocati, in modo opportuno, sulle porzioni basali delle pareti dei fabbricati ed in pozzetti a terra: nella prima fase si è proceduto alla loro materializzazione predisponendo un cir-

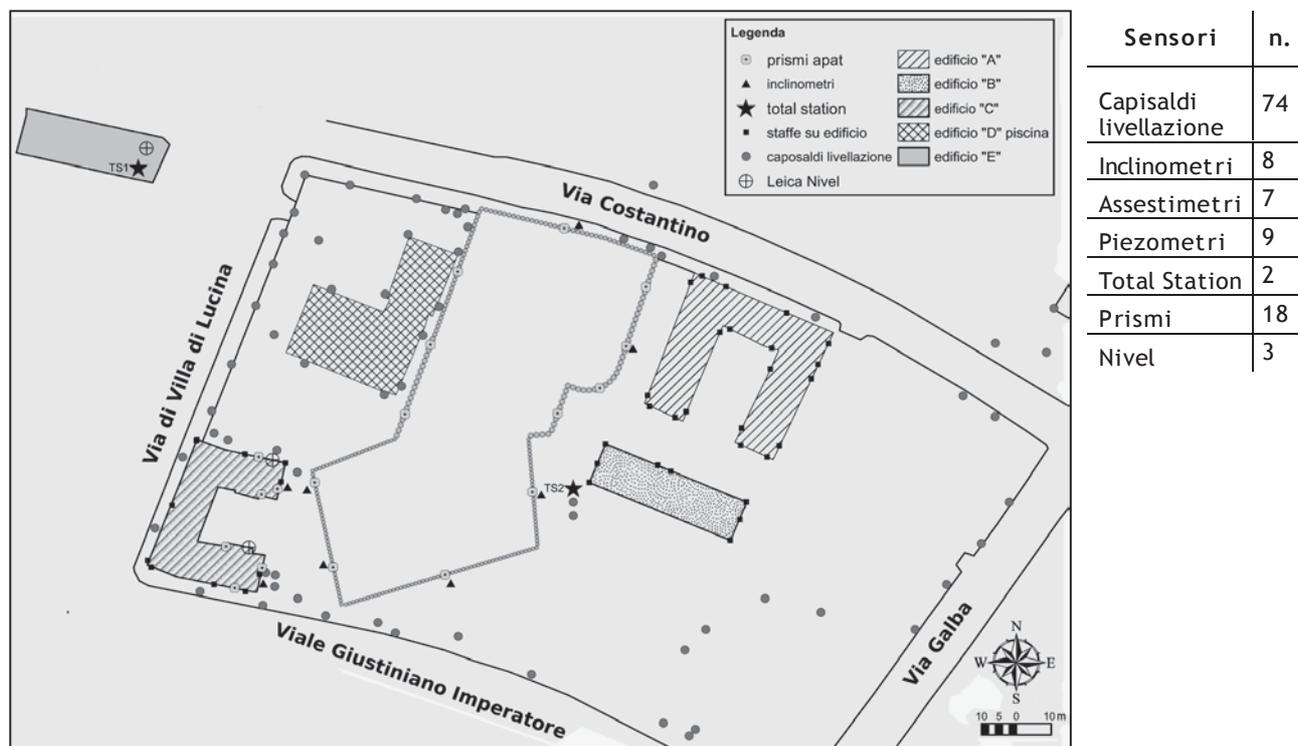


Figura 1 - planimetria dell'area coperta dalla rete di monitoraggio

cuito di livellazione con inizio e fine sul caposaldo di riferimento installato su un edificio ubicato in area stabile, corrispondente ad un settore occupato da depositi vulcanici pleistocenici. Sugli edifici i CS sono stati installati a 3,5 m da terra per ragioni di sicurezza; per analoghi motivi nell'area della piscina comunale i CS sono stati inseriti nei pozzetti di raccolta delle acque piovane, in corrispondenza del cordolo di fondazione della struttura ed in appositi pozzetti in cls 30x30 cm, con coperchio carrabile o pedonabile. I movimenti verticali del suolo vengono inoltre rilevati eseguendo misure in corrispondenza dei pozzetti in cui l'Università Roma Tre ha installato piezometri e assestimetri. Le misure vengono eseguite con cadenza adeguata di volta in volta all'evoluzione dei lavori e degli eventi. L'impianto della rete di livellazione, composto di circa 65 CS è rappresentato in fig.1.

Rete di monitoraggio con Stazioni Totali Robotizzate: sono state impiegate due stazioni totali automatizzate (Leica TCA 1800 e 2003) con riconoscimento automatico del target. L'accuratezza attesa nelle misure di distanza è di 1 mm, per gli angoli è dell'ordine di  $0,15 \div 0,3$  mgon. La Total Station TS1 è installata sulla terrazza del fabbricato E (fig. 1) ed effettua misure in continuo grazie al software GeoMoS di Leica, installato sul computer ubicato nello stesso stabile e deputato alla gestione delle operazioni di misura, con acquisizione e trasmissione in remoto dei dati al Centro Raccolta ed Elaborazione Dati (CRED) del Servizio Geofisica. La stazione controlla i prismi riflettori collocati sulle strutture a fronte, monitorando nel tempo sia il comportamento della trave di coronamento della paratia di pali, sia i movimenti del fabbricato C prospiciente l'area del cantiere. La seconda Stazione Totale, TS2, esegue invece misure periodiche da un pilastro in c.a. realizzato

all'interno del cantiere sulle strutture non visibili dalla stazione TS1. La stabilità del punto di stazione nel cantiere viene verificata tramite un prisma installato sul pilastro in c.a. e letto dalla TS1. L'ubicazione delle due Total Station coniuga le esigenze di configurazione geometrica della rete con le difficoltà logistiche derivanti dall'intensa urbanizzazione e con quelle derivanti dalle condizioni geoambientali. In particolare la TS1 (fig. 2) è posta su un edificio situato ai margini del



Figura 2 – Ubicazione TS1

riempimento del paleoalveo del fosso di Grotta Perfetta e configurata in modo da effettuare, preliminarmente ad ogni sessione di misura, il controllo su una rete di punti, situati su edifici in posizione geologicamente stabile o supposta tale, posizionati secondo una geometria regolare di contorno alla zona oggetto di studio riassumibile in un semicerchio. Solo dopo aver accertato la collimabilità dei suddetti punti di controllo, la stazione effettua la normale sessione di lettura con passo di campionamento adeguato di volta in volta alle necessità del monitoraggio, fino ad una frequenza massima di un ciclo ogni ora.

#### Rete di sensori inclinometrici per il controllo degli edifici.

Questo segmento è stato posto in essere in risposta alla specifica esigenza di determinare con estrema precisione le deformazioni di elementi strutturali di alcuni edifici dell'area, in un range di valori non risolvibili dagli altri sensori della rete. I sensori inclinometrici di precisione impiegati sono del tipo Leica Nivel 220i, biassiali, con elevata risoluzione strumentale (0.001 mrad; 0,6 cc) e accuratezza massima pari +/- 0.0047 mrad. Essi sono installati sul fabbricato "C" in corrispondenza di elementi strutturali portanti, alloggiati in una apposita custodia (fig.3). Uno dei sensori è stato installato inoltre sull'edificio in cui è presente la TS1, con l'obiettivo di controllare con elevata precisione i movimenti del fabbricato. Anche questi sensori sono stati inseriti nella rete di monitoraggio in telemisura, grazie alla possibilità di gestirli tramite il software GeoMoS, utilizzando radio-modem. I dati di inclinazione in milliradiani sono trasmessi via cavo seriale al PC o via radio-modem ogni 15 minuti insieme alla temperatura rilevata dal sensore e sono quindi inseriti in uno stesso database con quelli della Stazione TS1. Anche il controllo di questi sensori, così come per la stazione TS1, avviene da remoto dagli uffici del CRED.



Figura 3 – Sensore Leica Nivel

Al fine anche di verificare la rispondenza alle ipotesi progettuali del comportamento in profondità della paratia in corso d'opera durante le lavorazioni, sono state effettuate misure periodiche con cadenza quindicinale lungo 8 verticali inclinometriche ubicate come in fig.1. I tubi inclinometrici risultano attestati al substrato stabile, qui costituito dalle argille plioceniche rinvenibili al di sotto della sequenza alluvionale. Per le misure è stata utilizzata una sonda biassiale R.S.T. Instruments a lettura digitale con tecnologia "wireless", con una risoluzione delle misure di 0,005 mm per ogni passo di letture (500 mm) ed un campo di misura nominale di 38° (tarato a ±30°) con ripetibilità di ±0.003°.

#### **Considerazioni conclusive**

Il monitoraggio durante le fasi di avanzamento del cantiere ha fornito l'occasione per verificare le potenzialità di un sistema di monitoraggio plano-altimetrico nell'ambito di un importante intervento urbanistico in un area densamente urbanizzata, caratterizzata da un contesto geoambientale

complesso. Il sistema è stato quindi progettato per rilevare in maniera adeguata le deformazioni sulle opere di sostegno degli scavi e sul suolo circostante, ma anche le eventuali deformazioni degli edifici limitrofi, che in alcuni casi erano già interessati da fenomeni di deformazione.

L'entità delle deformazioni attese era di alcuni centimetri per le paratie, mentre per i fabbricati era necessario rilevare movimenti millimetrici. A tale scopo si è scelto di utilizzare, laddove possibile, strumentazione automatica installata in sito in grado di monitorare con elevata precisione ed in continuo i movimenti delle strutture, mentre le deformazioni del suolo sono state rilevate con campagne di misura periodiche. Inoltre si è prestata particolare attenzione nell'installazione delle strumentazioni e nella monumentazione dei punti di controllo al fine di ridurre il più possibile gli errori di misura (Erol et al. 2005). I dati finora acquisiti confermano la capacità e l'adeguatezza del sistema di monitoraggio messo in opera fin dalle prime fasi realizzative del delicato intervento urbanistico di sostituzione edilizia di registrare le deformazioni prodotte sulle opere di sostegno con elevata precisione, in particolare durante le fasi di scavo nei lati controllati in continuo. I cedimenti del terreno nell'area circostante il cantiere registrati sui capisaldi della rete di livellazione, hanno consentito di rilevare l'entità dei cedimenti naturali ancora in atto nell'area, con deformazioni progressivamente maggiori in direzione centripeta rispetto all'asse della paleo-valle (Viale

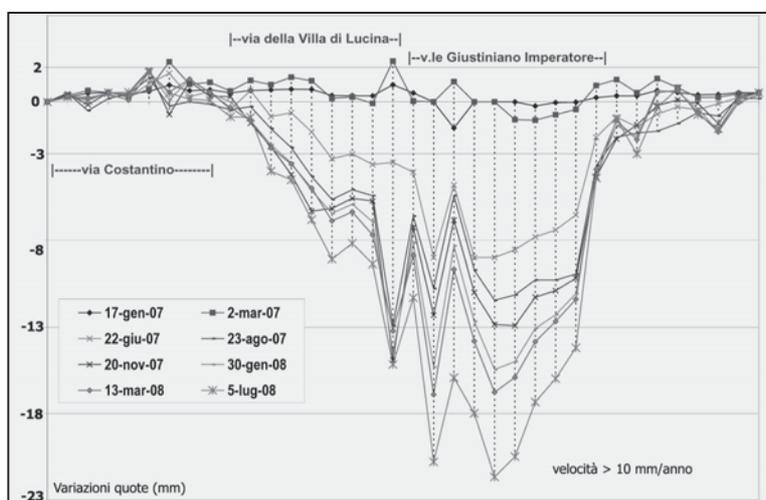


Fig.4 - deformazioni al suolo lungo il circuito di livellazione

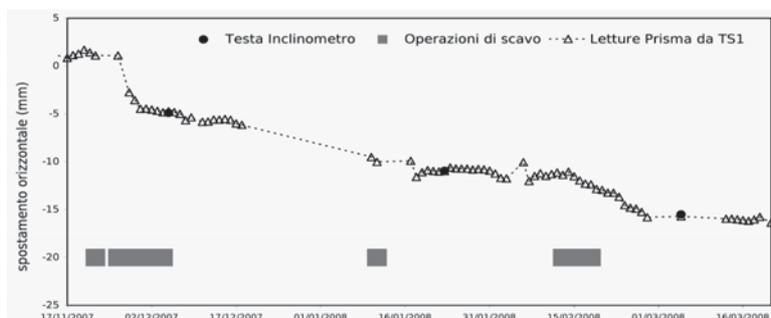


Fig.5 - monitoraggio della deformazione di testa della paratia

Giustiniano Imperatore), come appare evidente dal grafico di figura 4, dove sono riportati i valori di abbassamento del suolo lungo il perimetro del cantiere.

Le misurazioni periodiche lungo le verticali inclinometriche in adiacenza ai lati della paratia hanno invece permesso di descrivere dettagliatamente le deformazioni della paratia. Il loro confronto con i movimenti registrati in continuo su prismi riflettori installati sulla trave di coronamento ha consentito di determinare gli spostamenti reali della testa della paratia. Infatti gli spostamenti rilevati sui prismi hanno mostrato solitamente un ottimo accordo con quelli derivati dalle letture inclinometriche integrate dal basso, con scostamenti di qualche unità percentuale (fig. 5). In altri casi i valori di deformazione registrati dalla Stazione Totale in continuo mostrano una evidente non stabilità del piede dell'inclinometro, fornendo nel contempo una posizione certa della testa dell'inclinometro e consentendo quindi l'integrazione delle misure dall'alto.

Il monitoraggio dell'edificio prossimo al cantiere è stato attuato utilizzando contemporaneamente più tecniche di misura: vi sono stati installati sensori inclinometrici biassiali ad elevata precisione in acquisizione continua e prismi riflettori controllati in continuo dalla TS1, mentre il controllo dei suoi movimenti verticali è stato effettuato con misure di livellazione di alta precisione. L'uso

combinato delle due tecniche di misura in continuo si sta rivelando fondamentale per seguire le deformazioni dell'edificio sia in occasione delle operazioni di scavo, sia negli altri periodi. I primi dati rilevati, infatti, indicano un buon accordo tra le misure (fig.6) ed evidenziano la presenza di deformazioni riconducibili al fenomeno di subsidenza tuttora in atto nell'area, in particolare in

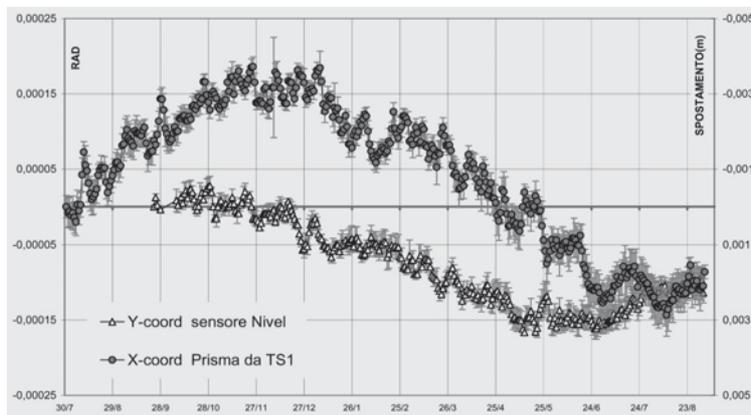


Fig.6 – esempio di confronto tra i dati di differenti sensori

corrispondenza dell'asse della paleovalle, ma non permettono di evidenziare un'influenza delle attività di cantiere sul fabbricato. I movimenti verticali, rilevati con accuratezza dalle misure di livellazione di alta precisione mostrano il quindi il coinvolgimento dell'edificio nei processi di subsidenza geologica in atto, seppure in misura molto inferiore, con una maggiore velocità dei cedimenti sul lato di V.le Giustiniano Imperatore.

La notevole complessità dei fenomeni di interazione tra i terreni soggetti a subsidenza e le strutture monitorate viene evidenziata, in alcuni casi, dalla loro non perfetta congruenza, l'analisi dei dati dovrà quindi essere approfondita al termine del monitoraggio per ottenere maggiori informazioni dalle serie storiche dei sensori in acquisizione continua e dalla loro correlazione.

## Bibliografia

- Bonci L., Calcaterra S., Cesi C., Gambino P., Gullà G. & Niceforo D. (2003), "Rischi geologici in aree urbane: due esempi di monitoraggio in emergenza con stazione totale". *Atti 7° Conferenza Nazionale ASITA, ottobre 2003, Verona*, 28-31
- Campolunghi M.P., Capelli G., Funicello R., Lanzini M. (2007), "Geotechnical studies for foundation settlement in holocenic alluvial deposits in the city of Rome (Italy)", *Engineering Geology*, 89: 9-35
- Erol B., Erol S., Celik R.N. (2005) – "Monitoring and analysing structural movements with precise inclination sensors", *Geodetic deformation monitoring: from geophysical to engineering roles – IAG Symposium, Jaén, Spain March 17-19, 2005*, 116-124
- Funicello R., Testa O., Campolunghi M.P., Lanzini M. and Cecili A. (2004), "La struttura Geologica dell'area Romana e il Tevere", *Atti del Convegno "Ecosistema Roma", 14/16 Aprile 2004*, Accademia Nazionale dei Lincei
- Simeoni L. (2006), "Effects of the instruments bias on the reliability of manual inclinometer measures", *Proc. of the XIII Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, 'Active Geotechnical Design in Infrastructure Development', Ljubljana, May 29-31, 2006*