

MONITORAGGIO STRUTTURALE DI UNA GRANDE DIGA MEDIANTE LASER SCANNING TERRESTRE

M. Alba(*), C. Savi (*), L. Fregonese(*), A. Giussani(*), F. Prandi(*), F. Roncoroni(*),
M. Scaioni(*), P. Valgoi(**)

(*) Politecnico di Milano – D.I.I.A.R., p.za L. da Vinci 32, 20133 Milano, Italia

e-mail: {mario.alba, luigi.fregonese, alberto.giussani, federico.prandi, fabio.roncoroni, marco.scaioni}@polimi.it

(**) AEM S.p.A. – Area Produzione, Grosio (SO), Italia, e-mail: paolo.valgoi@aem.it

Keywords: Precisione, Monitoraggio di dighe, Analisi delle deformazioni, Georeferenziazione, Laser Scanning Terrestre

Riassunto

Questo articolo presenta i primi risultati ottenuti nell'ambito di un progetto finalizzato a verificare l'utilizzo del *laser scanning* terrestre per il monitoraggio delle deformazioni di grandi dighe in calcestruzzo. Per questo scopo è stato allestito un campo prova sperimentale presso la diga del lago di Cancano (Valtellina, Italia). Fino ad oggi sono state realizzate 3 campagne di misura durante le quali sono stati utilizzati 2 diversi *laser scanner*: uno strumento di lunga portata Riegl LMS-Z420i e uno di media portata Leica HDS 3000. Le analisi che vengono riportate riguardano prevalentemente due problemi: il primo è la valutazione della precisione e della stabilità della georeferenziazione delle scansioni, il secondo è costituito dalla valutazione delle deformazioni che le superfici confrontate hanno subito.

Abstract

This paper presents the first results of a project aimed to assess the feasibility of monitoring deformations of large concrete dams by terrestrial laser scanning. For this purpose a test field has been established on the dam of the Cancano Lake (Valtellina, Italy). Three measurement campaigns have been accomplished so far by using two laser scanners: a long range Riegl LMS-Z420i and a medium range Leica HDS 3000. Reported analyses are focused on two main problems: the first one is the accuracy and the stability of georeferencing; the second one is the computation of deformation based on the acquired point-clouds.

1. Introduzione

Questo articolo presenta alcuni risultati di una ricerca sperimentale finalizzata a verificare l'impiego delle tecniche *laser scanning terrestri* per il controllo delle grandi dighe. Questa attività è stata pianificata in cooperazione con A.E.M. S.p.a. Area Produzione, che ha messo a disposizione una delle dighe in concessione (diga del lago di Cancano) per realizzare un campo prova presso il quale sono state realizzate diverse campagne di misura impiegando 2 diversi strumenti *laser scanner*. L'acquisizione dei dati è stata progettata in modo da misurare una densa nuvola di punti con la precisione più alta possibile. Il concetto fondamentale che si vorrebbe applicare per l'analisi delle deformazioni è basato sull'impiego di un metodo *area-based* (Schneider, 2006), che si basa sul confronto tra superfici matematiche regolari che interpolano i punti misurati in differenti epoche, in modo da ridurre l'effetto del rumore (Lindenbergh & Pfeifer, 2005). Dal momento che tutti i dati sono stati già georeferenziati nello stesso sistema di riferimento, il confronto tra le diverse superfici interpolanti consentirebbe di determinare le deformazioni. Sfortunatamente, la georeferenziazione è affetta da errori, per cui in questa analisi occorre saper individuare quale parte degli spostamenti individuati sia effettivamente dovuta al movimento della struttura. Al corrente stato di avanzamento del progetto sono state eseguite soltanto analisi delle deformazioni basate su metodi più semplici, come verrà illustrato al par. 5.

In questa fase iniziale maggiore importanza è stata data allo studio della *stabilità della georeferenziazione*, che risulta essere fondamentale per poter eseguire confronti tra superfici nel tempo (par. 4). Inoltre, la prima parte dell'articolo descriverà la fase di acquisizione dei dati sperimentali, presentando il campo prova allestito (par. 2) e le misure eseguite (par. 3). Una descrizione più ampia e dettagliata del presente lavoro è riportata in Alba *et. al.*, 2006.

2. Il campo prova presso la diga del lago di Cancano

La peculiarità di questa ricerca, considerato il suo carattere sperimentale, è costituita dal campo prova istituito presso la diga del lago di Cancano (in Alta Valtellina, Sondrio) per eseguire l'analisi delle deformazioni sulla base di misurazione eseguite con *laser scanning*.

La diga del lago di Cancano (situata a circa 1900 m s.l.m.) è stata costruita negli anni '50 sul corso del fiume Adda, generando un bacino del volume di circa 124 milioni di metri cubi di acqua (Fig. 1A). Questa presenta una struttura da arco-gravità alta 136 m e con un coronamento di lunghezza pari a 381 m in sommità. Lo stato di conservazione della struttura è buono, grazie ai controlli che vengono condotti mediante sensori di tipo tradizionale (deformometri, clinometri, ecc.) e con misurazioni topografiche periodiche (livellazioni geometriche, reti geodetiche di controllo, collimazioni ottiche).

Nell'area su cui sorge la diga era già presente una rete topografica realizzata all'epoca della sua costruzione. A causa del pessimo stato di conservazione di alcuni suoi vertici ne è stata realizzata e misurata una nuova, costituita da 11 vertici principali materializzati mediante chiodi topografici infissi nel suolo in corrispondenza di elementi in cemento (lo schema della rete è riportato in Fig. 1B). Questa rete definisce il *datum* topografico locale (*Ground Reference System* - GRS).

La misurazione della rete topografica di inquadramento è stata condotta nel mese di maggio 2005 grazie ad una stazione totale Leica TCA2003. La compensazione a minimi quadrati delle misure eseguite ha permesso di determinare le coordinate 3D dei punti con uno s.q.m. pari a ± 2 mm in X-Y e ± 3 mm in Z.

Sul paramento di valle della diga e in alcune posizioni stabili attorno a quest'ultima sono stati posizionati alcuni *punti di controllo* (GCP) aventi una duplice finalità. Innanzitutto, per poter confrontare scansioni acquisite in epoche diverse, è necessario disporre di un certo numero di GCP per poterle georeferenziare all'interno dello stesso sistema di riferimento. In secondo luogo, per validare l'analisi delle deformazioni realizzata a partire dalle misure *laser scanning* occorre anche disporre di altre misurazioni indipendenti. Per questo scopo sono stati posizionati alcuni *punti di controllo indipendenti* (*Check Point* – ChkP) sul paramento della diga. Le coordinate di questi ultimi si aggiungono ai dati provenienti dagli strumenti e dai sensori di controllo già installati sulla diga stessa.

Tutti target (15 GPC+ 68 ChkP) sono stati materializzati nel maggio 2005 mediante dischi in alluminio ($\phi=120$ mm) recanti in posizione centrale un'area circolare in materiale retro-riflettente ($\phi=100$ mm); questi sono stati fissati al paramento della diga e su rocce stabili situate in prossimità dei punti di stazione con *laser scanner* 6000 e 8000.

La determinazione delle coordinate dei target rispetto al GRS è stata compiuta nel corso delle operazioni di misurazione della rete topografica di inquadramento, utilizzando un'intersezione multipla a partire dai vertici più vicini. Per quanto riguarda invece i target posizionati sul paramento, la determinazione delle coordinate è stata eseguita con le sole misure angolari acquisite dai vertici 5000, 7000, 9000 e 10000. Il motivo di questa scelta è da imputarsi al fatto che in molti casi si ha un angolo di incidenza tra la direzione di collimazione dalla stazione totale e la superficie del target piuttosto ridotto, che causa una maggiore incertezza nella misura della distanza. La precisione nella misura delle coordinate dei target è quindi risultata pari a ± 3 mm in X-Y e $\pm 4,5$ mm in Z.

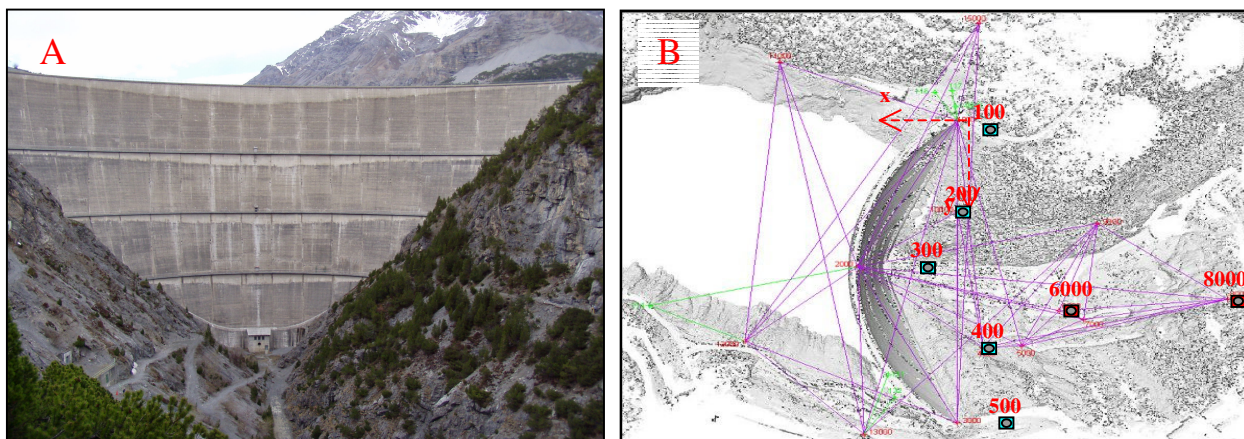


Fig. 1. A-Vista frontale del paramento della diga di Cancano; B- Schema della rete topografica di inquadramento riportante anche i punti di stazione con laser scanning.

3. Descrizione dei dati acquisiti durante le campagne di misura

Il rilevamento con *laser scanning* è stato eseguito con due strumenti a *tempo di volo* aventi caratteristiche piuttosto diverse. Il primo è uno strumento a lunga portata modello Riegl LMS-Z420i, il secondo è un *laser scanner* a media portata Leica HDS 3000. Per le specifiche tecniche si rimanda alle case costruttrici o a Ingensand (2006).

Le campagne di misura sono state programmate in modo da acquisire i dati nei periodi corrispondenti al massimo (all'inizio dell'autunno) e al minimo (al termine della primavera) livello dell'acqua nel bacino, e quindi alla massima e alla minima deformazione della diga. In accordo con questo criterio, sino alla stesura di questo articolo sono state realizzate 3 campagne di misura.

Le scansioni con lo strumento Riegl LMS-Z420i sono state acquisite a partire da 2 punti, posizionati rispettivamente ad una distanza media pari a circa 200 m (stazione 6000) e 300 m (stazione 8000). L'area misurata è costituita dalla porzione centrale del paramento della diga, che è quella soggetta alle maggiori deformazioni.

Grazie all'utilizzo della misurazione in modalità "multiscan" con $n=4$ ripetizioni è stato possibile ridurre di un fattore 0,5 lo s.q.m. della misura della distanza.

Le scansioni con lo strumento Leica HDS 3000 sono state acquisite a partire da 5 punti di stazione, posizionate ad una distanza media variabile da 50 a 120 m rispetto alla diga. Nella planimetria in Figura 1B queste stazioni sono state indicate coi codici 100, 200, 300, 400 e 500. La georeferenziazione dei dati è stata attuata grazie ai target dedicati forniti dal produttore, che sono stati distribuiti sull'intera superficie della diga in modo da garantire un vincolo stabile. Un numero oscillante tra 6÷8 target sono stati adottati per georeferenziare ciascuna scansione.

4. Analisi della stabilità della georeferenziazione

La georeferenziazione delle scansioni è stata realizzata utilizzando in primo luogo due software commerciali: Riscan Pro per i dati Riegl e Cyclone per i dati Leica. In un secondo tempo, le coordinate di tutti i GCP e i ChkP misurati sono stati importati in un programma di tipo scientifico che ha consentito di effettuare analisi sulla precisione dei risultati maggiormente raffinate al fine di verificare la stabilità della georeferenziazione alle diverse epoche.

Entrambe le scansioni acquisite con lo scanner Riegl LMS-Z420i sono state georeferenziate utilizzando 9-10 GCP in posizioni esterne alla diga. Per verificarne la stabilità, un'ulteriore stima è stata condotta fissando tutti i ChkP disponibili per ciascuna scansione. Lo scopo di questo test è stato quello di analizzare la possibilità di materializzare un sistema di riferimento stabile basato esclusivamente su GCP esterni alla struttura, fatto che eviterebbe la rideterminazione topografica

delle coordinate di questi ultimi ad ogni acquisizione di dati *laser scanning*. Come si può vedere nella Tabella 1, gli s.q.m. risultano simili con entrambi i tipi di vincolo; inoltre, l'aggiunta di GCP non significa sempre un aumento della precisione di stima, probabilmente per la presenza di *outliers* tra i target misurati.

Si considerano ora gli effetti dell'incertezza dei parametri di georeferenziazione sui dati finali. La varianza delle coordinate del centro dell'IRS influisce direttamente sulla varianza dei punti 3D misurati, come è descritto in Scaioni (2005). L'entità di questi errori è generalmente nell'ordine di pochi millimetri. L'incertezza degli angoli di rotazione si propaga su quella dei punti 3D risultando in errori dello stesso ordine di grandezza dei precedenti. L'analisi delle differenze tra i parametri stimati a partire da entrambe le configurazioni di vincolo per ciascuna scansione ha evidenziato differenze medie in valore assoluto pari a circa 3÷4 mm per X_0 , Y_0 e Z_0 , e 2÷3 mgon per le rotazioni.

Un'ulteriore analisi della qualità della georeferenziazione è stata realizzata fissando i parametri stimati a partire dai soli GCP esterni al paramento della diga e calcolando gli scarti residui rispetto ai ChkP collocati sulla struttura. Le statistiche calcolate sui residui hanno evidenziato due aspetti (si veda la Tabella 2). Il primo concerne le medie, che variano tra valori molto bassi (per esempio nel caso delle scansioni 6000 dell'ott. 2005 e del mag. 2006) sino ad altri piuttosto rilevanti, che potrebbero essere imputabili ad errori nella georeferenziazione ma anche a problemi nella determinazione topografica dei target.

Inoltre, il comportamento dei residui è indipendente dalla direzione, fatto che attesta l'assenza di un particolare sistematismo negli errori in tutte le scansioni. Un'analisi maggiormente accurata della distribuzione geometrica dei residui sui ChkP ha rivelato l'esistenza di alcuni problemi riguardanti la misurazione delle coordinate dei target nell'IRS, probabilmente imputabili alla variazione dell'angolo di incidenza dei raggi *laser* rispetto alla superficie retro-riflettente dei target. I problemi illustrati risultano comunque essere di entità limitata entro pochi millimetri e dunque sono stati trascurati in una prima analisi.

Infine, gli s.q.m. dei residui sono concentrati attorno a valori di $\pm 8 \div 9$ mm per tutte le coordinate con poche eccezioni e comunque limitate nel valore. Si può ritenere dunque che la precisione nella misura dei target sia piuttosto stabile.

Scansione	Camp.	GCP	σ_0 (mm)	S.q.m. delle coord. dell'origine dell'IRS (mm)			S.q.m. degli angoli di rotazione dell'IRS (mgon)		
				X_0	Y_0	Z_0	ω	ϕ	κ
6000	Maggio 2005	9	5,7	4,5	5,0	5,1	2,6	2,5	2,1
		42	5,8	3,1	3,4	3,6	1,2	1,4	1,3
	Ottobre 2005	10	9,8	4,6	4,8	5,3	4,2	2,3	1,9
		41	6,7	2,5	2,7	2,8	1,4	1,2	1,0
	Maggio 2006	10	7,3	2,8	2,8	3,2	9,9	10,6	1,3
8000	Maggio 2005	43	10,6	3,2	3,4	3,6	9,9	9,9	1,3
		9	6,4	2,8	2,8	3,0	3,8	1,6	1,0
	Ottobre 2005	43	8,8	3,5	3,7	3,8	1,9	1,2	0,8
		10	12,0	5,5	5,6	5,6	5,3	2,1	1,7
	Maggio 2006	40	8,3	3,4	3,6	3,7	1,4	0,8	0,8
		9	6,1	2,7	2,8	2,9	3,0	1,2	0,9
		47	8,0	3,1	3,2	3,4	1,3	0,8	0,7

Tabella 1.- Precisione stimata per i parametri di georeferenziazione considerando entrambe le configurazioni di vincolo esterno.

Scansione	Camp.	Residui sui ChkP (mm)					
		#	media			S.q.m.	
			ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY
6000	Maggio 2005	39	-14	-7	-4	± 9	± 9
	Ottobre 2005	31	3	-2	2	± 6	± 7
	Maggio 2006	30	-2	1	1	± 8	± 13
8000	Maggio 2005	34	-2	-4	-8	± 6	± 12
	Ottobre 2005	30	-1	-4	9	± 5	± 7
	Maggio 2006	24	-7	3	-5	± 8	± 10

Tabella 2. - Residui sui punti di controllo indipendenti (ChkP).

5. Primi risultati del monitoraggio

Grazie alle tecniche TLS è oggi possibile acquisire una densa nuvola di punti che descrive in modo accurato la superficie esterna di una diga. Purtroppo, anche avendo a disposizione diverse scansioni georeferenziate nello stesso sistema di riferimento, l'analisi delle deformazioni non può essere realizzata dal confronto diretto dei singoli punti, a causa dell'impossibilità di misurare esattamente nelle diverse sessioni gli stessi punti per l'imperfezione nel riposizionamento dello strumento e per la divergenza del raggio laser.

Per ridurre almeno parzialmente il rumore delle misure si è quindi pensato di utilizzare una tecnica "area based" (Schneider, 2006) per la valutazione delle deformazioni.

Sino ad oggi sono stati realizzati alcuni test considerando una coppia di scansioni acquisite dal punto 8000 nei mesi di ott. 2005 e mag. 2006 con lo scanner Riegl LMS-Z420i. Benchè questa stazione sia la più distante dalla diga, gli angoli di incidenza tra il raggio *laser* e la superficie della struttura sono in generale più vicini alla direzione della normale a quest'ultima, con la conseguenza di un minore rumore nelle misure rispetto a quanto è stato osservato nelle scansioni dal punto 6000.

La prima operazione condotta sui dati, dopo la georeferenziazione, è stato il ricampionamento di entrambe le nuvole di punti originali secondo un grigliato bidimensionale di passo 2 cm e tangente alla superficie della diga in posizione intermedia della sezione in mezzzeria. Successivamente sono state ricavate due diverse superfici interpolanti. La prima è costituita da una *mesh triangolare*, che è stata calcolata a partire da entrambe le superfici. Come passo successivo, da quest'ultima è stata interpolata una *superficie polinomiale 3D*. Al termine delle operazioni di interpolazione sono stati eseguiti 4 diversi confronti. Nei casi 1 e 2, il calcolo delle deformazioni è stato effettuato con il criterio della *distanza minima* tra ciascun punto di una scansione e la superficie interpolata dell'altra. Nei casi 3 e 4 è stato eseguito in corrispondenza dei valori delle superficie ai nodi di un grigliato regolare. In Fig. 2 sono riportate alcune mappe che mostrano le deformazioni della porzione centrale della diga acquisita dalla stazione 8000 secondo le diverse tecniche di confronto impiegate. Le deformazioni determinate nel punto centrale del paramento corrispondono ai valori misurati mediante stazione totale. Inoltre, quelle riguardanti la porzione rimanente dell'intero paramento sono risultati in accordo con il comportamento strutturale atteso per questa diga¹.

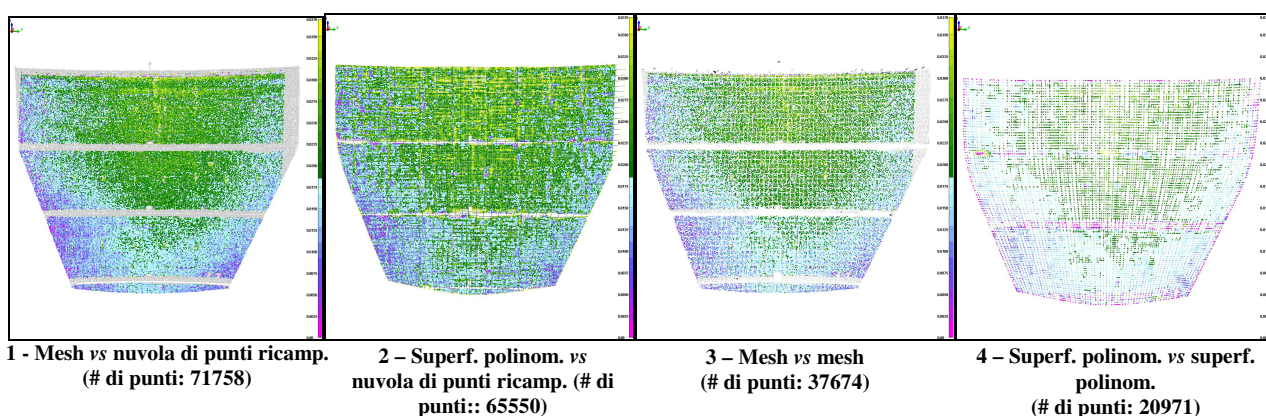


Fig. 2.- Mappe delle deformazioni valutate dal confronto dei diversi tipi di superfici ottenute dalle scansioni acquisite dalla stazione 8000 nei mesi di ottobre 2005 e maggio 2006.

6. Considerazioni finali e sviluppi futuri

I risultati illustrati al par. 5 mostrano chiaramente come l'utilizzo delle tecniche *laser scanning* possa fornire un contributo rilevante all'analisi delle deformazioni delle grandi dighe. I primi prodotti delle elaborazioni sui dati condotte finì ad ora sono infatti costituiti da dense e accurate

¹ I valori corrispondenti alle scale di colore utilizzate in figura 5 sono stati volutamente omessi per riservatezza.

mappe delle deformazioni del paramento frontale della diga (Fig. 2). Questi risultati costituiscono qualcosa di nuovo rispetto a quanto può essere ottenuto coi classici metodi topografici, che danno misure di spostamento limitatamente ad un piccolo numero di punti. Analoghe mappe potrebbero essere ottenute grazie alle tecniche *SAR terrestri*, anche se l'utilizzo del *laser scanning* è maggiormente operativo in quanto non richiede lo stazionamento continuativo della strumentazione.

Lo sviluppo della ricerca prevede innanzitutto il trattamento dei dati acquisiti con Leica HDS 3000 in modo analogo a quanto fatto per l'altro *laser scanner* impiegato. Nello stesso tempo si vuole cominciare ad investigare due problemi specifici. Il primo è costituito dal miglioramento dell'accuratezza della georeferenziazione, che dipende sia dalla distribuzione geometrica dei GCP, sia dalla precisione della misura di questi ultimi nel GRS e nell'IRS. La misurazione dei target costituisce un aspetto che richiede ulteriori analisi, in quanto probabilmente viene a dipendere dall'angolo di incidenza tra il raggio *laser* e la superficie del target. Anche la risposta del materiale retro-riflettente costituisce un problema che deve essere investigato opportunamente mediante specifici test sperimentali. In ogni caso, la strategia di aumentare il numero dei target per incrementare l'affidabilità della georeferenziazione può costituire un'efficace soluzione operativa.

Il secondo aspetto da approfondire è costituito dalla tecnica per eseguire l'analisi delle deformazioni, in quanto sino ad ora sono state applicate soltanto soluzioni basate sulle funzioni implementate in software commerciali.

Infine si vuole sottolineare come l'utilizzo dei risultati della presente ricerca da parte degli ingegneri strutturisti rappresenta un aspetto destinato ad influenzarne gli sviluppi futuri e ad avviare nuove sperimentazioni. L'impiego che le tecniche *laser scanning* potrebbero avere è quello del monitoraggio periodico, non certamente quello continuo dove gli strumenti usati attualmente sono sufficienti per tenere sotto controllo un numero limitato di punti significativi della struttura. La disponibilità delle deformazioni stagionali di una diga consentirebbe invece di raffinare le analisi computazionali, che fino ad oggi sono state realizzate considerando soltanto la geometria di progetto della struttura.

Ringraziamenti

Questo progetto è stato parzialmente finanziato all'interno del progetto di ricerca nazionale "COFIN 2004" (Prot. 2004080741) coordinato dal Prof. C. Monti (Politecnico di Milano). Ringraziamenti vanno ad A.E.M. S.p.a. Area Produzione (Grosio, Italia) per aver concesso la disponibilità dell'impianto di Cancano e per l'assidua collaborazione.

Bibliografia

Alba M., Fregonese L., Prandi F., Scaioni M., Valgoi P., 2006. Structural Monitoring of a Large Dam by Terrestrial Laser Scanning. In printing in: Int. Arch. of Phot., R.S. and Spatial Inf. Sc., Vol. 36, Dresden (Germany).

Ingensand H., 2006. Metrological Aspects in Laser-Scanning Technology. In: Proc. of 3rd IAG/12th FIG Symp., Baden, Austria, May 22-24, pp. 10, su CDROM.

Lindenbergh R., N. Pfeifer, 2005. A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock. In: Proc. of Optical 3D Measurement Techniques, Vol II, Vienna, Austria, pp. 61-70.

Scaioni M., 2005. Direct Georeferencing of TLS in Surveying of Complex Sites. Int. Arch. of Phot., R.S. and Spatial Inf. Sc., Vol. 36(5/W17), Mestre, Italy, pp. 8, unpaginated CDROM.

Schneider D., 2006. Terrestrial Laser Scanning for Area Based Deformation Analysis of Towers and Water Dams. In: Proc. of 3rd IAG/12th FIG Symp., Baden, Austria, May 22-24, pp. 10, su CDROM.