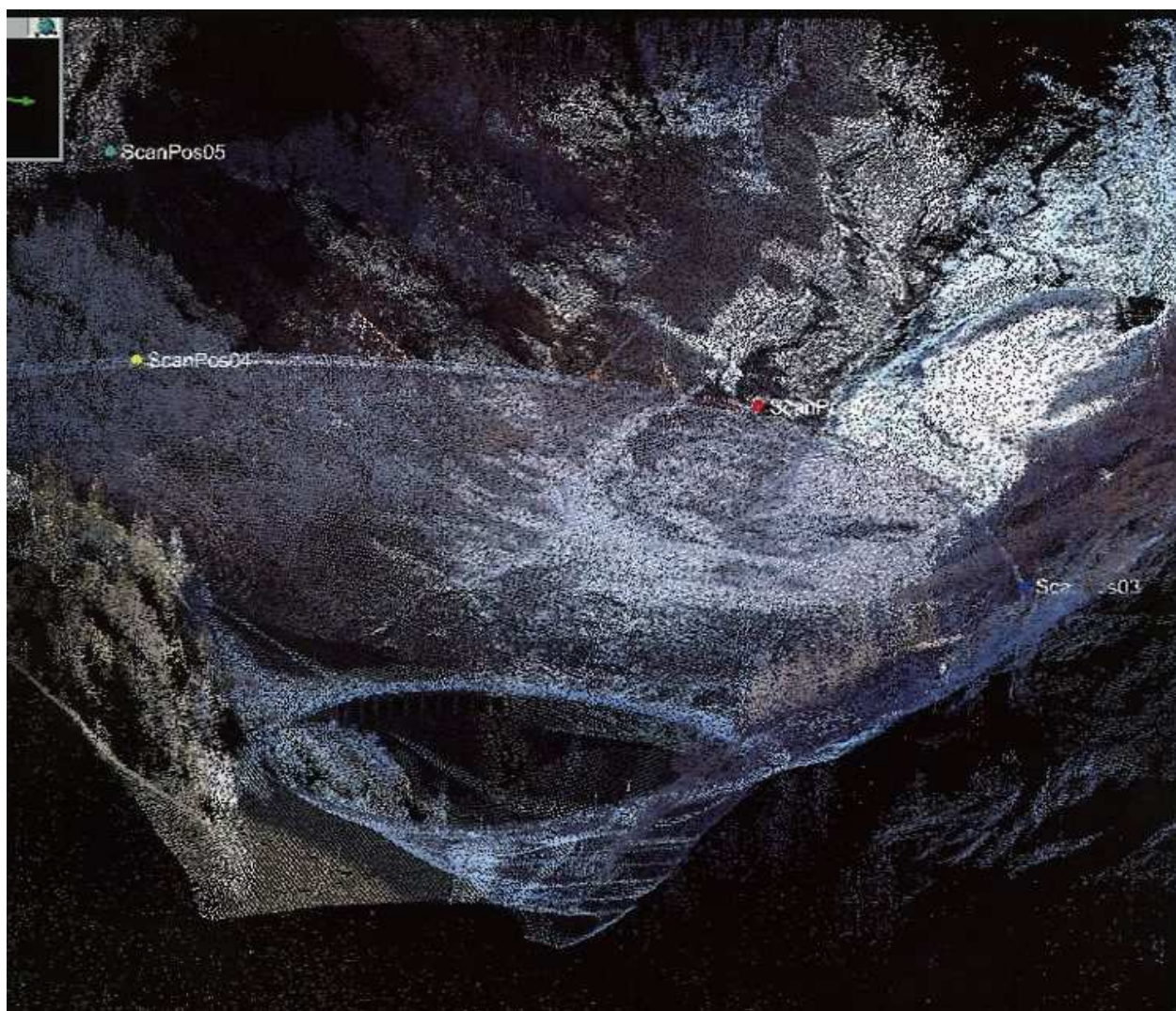


LASER SCANNING TERRESTRE



Diga di Beauregard - Valgrisenche

GRUPPO DI LAVORO ITCOLD

Metodi innovativi per il monitoraggio delle dighe e dei versanti e possibili futuri sviluppi



1 - PREMESSA

Nella presente relazione si vuole illustrare la metodologia di rilievo laser a scansione (Laser Scanning) e le sue applicazioni nel campo del controllo e monitoraggio di dighe e versanti. Il lavoro è esplicato nell'ambito del gruppo di lavoro "Metodi innovativi per il monitoraggio delle dighe e dei versanti e possibili futuri sviluppi".

Si analizzeranno prima le principali caratteristiche della metodologia, i limiti, i vantaggi e infine alcuni esempi di applicazione. Le informazioni sono tratte da articoli e esperienze scientifiche di cui si riporta l'elenco in bibliografia.

2 - IL LASER SCANNING

La tecnica del laser scanning rappresenta un nuovo ed efficiente metodo per la digitalizzazione e la modellizzazione di oggetti e di porzioni di territorio aventi qualsiasi forma e dimensione. La digitalizzazione avviene in modo discreto attraverso la misurazione della posizione di un elevato numero di punti, dell'ordine di qualche decina di milioni (circa 8000 punti al secondo).

La tecnica del laser scanning si basa sul metodo di misurazione delle distanze per mezzo di onde elettromagnetiche, anche noto con il nome di LIDAR (light detection and ranging).

Nato nel 1933 ha subito un'evoluzione e diffusione fino ad apportare più di recente, a una conseguente rivoluzione dei metodi di rilevamento e calcolo.

I sensori laser scanner si basano sull'unione di un distanziometro laser ad un insieme di apparati meccanici di alta precisione. La meccanica dello strumento permette di materializzare una direzione di acquisizione mentre il distanziometro laser acquisisce una distanza lungo la direzione stessa. Il risultato dell'acquisizione è un insieme di punti sparsi nello spazio in modo più o meno regolare che comunemente viene chiamata "nuvola di punti".

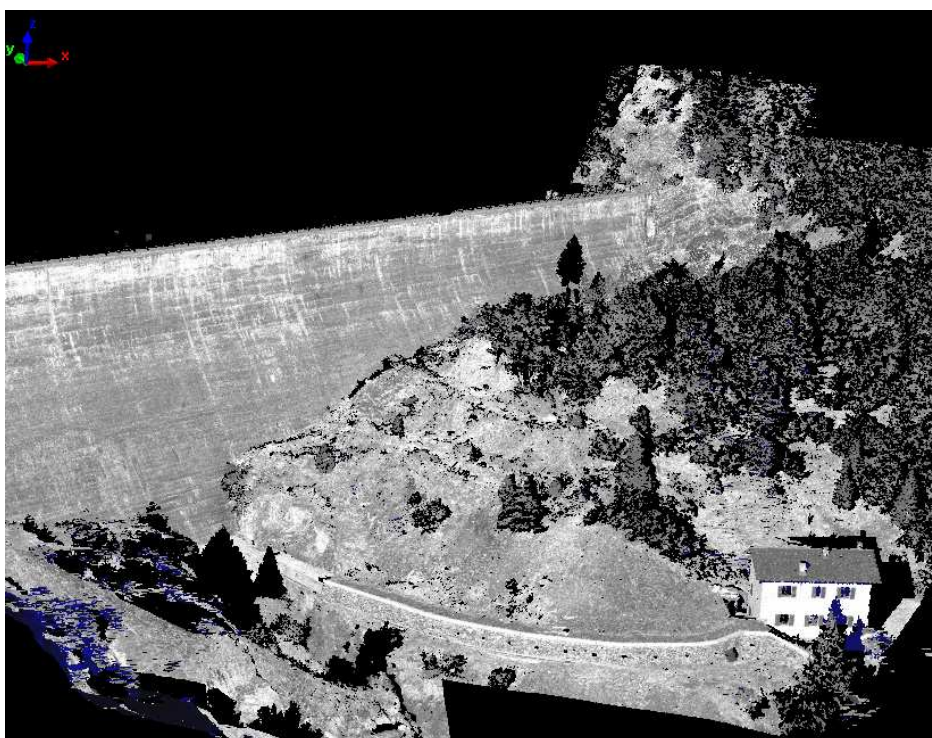
Il principio fondamentale su cui si basa la tecnologia "laser scanner" è il calcolo del tempo di volo di un impulso laser generato da un emettitore, che viene riflesso dalla superficie colpita dall'impulso stesso e captato dal ricevitore installato a bordo dello strumento. Il tempo di volo corrispondente all'intervallo di tempo che intercorre tra l'istante di emissione dell'impulso e quello di ritorno, consente di determinare la distanza tra lo strumento ed il punto rilevato. Lo strumento esegue una rapidissima scansione della superficie rilevata, consentendo di ricostruire un modello tridimensionale della superficie rilevata



Per approfondimenti sul raggio laser, sui tipi e comportamento dei laser e sui principi di funzionamento dei distanziometri rimandiamo alla letteratura tecnica sull'argomento.



foto diga di Alto Mora



Scansione laser 3D diga di Alto Mora



TIPOLOGIE DI LASER SCANNER CARATTERISTICHE (PRECISIONE, PORTATA, VELOCITA')

I laser scanner oggi presenti sul mercato sono molti ed ognuno di essi presenta caratteristiche differenti nel principio di acquisizione, nella precisione ottenibile, nella portata e nella velocità di acquisizione. La prima classificazione che è possibile effettuare è quella che distingue gli strumenti a seconda del principio di acquisizione che utilizzano:

1. laser scanner distanziometrici

La misura della posizione tridimensionale del punto avviene in coordinate sferiche. Per ogni punto acquisito sono misurati un angolo orizzontale (azimutale), un angolo verticale (zenitale) e una distanza inclinata. Per questo motivo spesso i sistemi a scansione laser terrestri sono considerati quali stazioni totali ad elevata automazione. La differenza sostanziale però è che nel rilevamento con il laser scanner non vi è alcuna possibilità di scegliere i punti da rilevare come con le tecniche di topografia classiche. È possibile in genere definire solo l'area che si vuole acquisire e la densità di punti desiderata. Definiti questi parametri l'acquisizione è completamente automatica. Gli strumenti laser scanner distanziometrici oggi sul mercato utilizzano in genere distanziometri ad impulsi laser che misurano il tempo di volo del segnale, ovvero distanziometri ad impulsi, in quanto permettono di effettuare misure molto velocemente (circa 10000 punti/sec) con precisioni elevate (dell'ordine dei $5 \div 10 \text{ mm}^1$). La portata massima oggi raggiungibile con un sensore laser di classe 1 (non pericoloso per la vista) è di circa 800 m.

2. laser scanner triangolatori

Sono strumenti che, per la misurazione della posizione di punti, utilizzano il principio dell'intersezione in avanti. Si tratta di strumenti di forma allungata o a tubo dotati di un diodo emettitore e di un diodo ricevitore posizionati agli estremi dello strumento stesso. Il segmento che unisce i due diodi è chiamato comunemente base e la sua dimensione non può in genere superare alcuni limiti pratici di maneggevolezza (circa un metro); ne consegue ovviamente un limite nella portata dello strumento. Per la determinazione della posizione del punto acquisito sono misurati una distanza e due angoli (l'angolo che si forma tra il raggio emesso e la base dello strumento e

¹ NOTA 1: La precisione ottenibile con uno strumento a tempo di volo che utilizza un laser di classe 1 è al massimo di $4 \div 6 \text{ mm}$ a circa 100 m, valore che decresce in modo non significativo all'aumentare della distanza. La distanza massima misurabile oggi è di circa $800 \div 1000 \text{ m}$ nel caso dei distanziometri ad impulsi che non necessitano di prisma riflettente. Questa distanza cresce notevolmente se si utilizzano prismi riflettenti ma in generale i sensori laser scanner sono concepiti per una digitalizzazione di oggetti e non per la misurazione delle coordinate di un solo punto materializzato (prisma) e quindi difficilmente questa situazione si verifica.



l'angolo che si forma tra il raggio riflesso e la base). Tale geometria di acquisizione consente di ottenere precisioni molto elevate (sub millimetriche) portate limitate (dell'ordine di qualche metro) e tempi di acquisizione mediamente elevati.

Altre distinzioni possono riguardare il posizionamento del laser scanner: vi sono i laser scanner mobili che hanno ridotte dimensioni tali quindi da essere trasportabili e posizionabili su treppiedi, permettono di inquadrare la zona desiderata, sono quelli usati per i rilievi topografici; vi sono i laser scanner statici che rimangono in una posizione fissa nel tempo e sono impiegati per il monitoraggio di movimenti e deformazioni o per il rilevamento di alta precisione.

Si possono poi distinguere strumenti a piccola portata (<1m, in genere laser triangolatori con precisioni sub-millimetriche), strumenti a media portata (1m ÷ 50 m, distanziometrici o triangolatori con precisioni da 0,2 a 6 mm) e strumenti a lunga portata (50 m ÷ 1000 m, distanziometrici con precisioni da 5 mm a 2 cm).

Naturalmente la portata del laser è funzione del tipo di materiale colpito dal raggio ed, in particolar modo, dalla riflettività del materiale alla lunghezza d'onda del laser (maggiore è la riflettività del materiale maggiore sarà la portata ottenibile).

Altre caratteristiche per stabilire la qualità di uno strumento laser scanner per il rilevamento di un dato oggetto sono:

- velocità di acquisizione
- risoluzione di scansione e divergenza del raggio laser
- portata nominale ed effettiva
- campo di misura
- acquisizione dell'intensità di segnale riflesso ricevuto (riflettività)
- riconoscimento automatico di segnali
- acquisizione RGB (interna o attraverso apparecchi esterni)
- autonomia operativa dello strumento
- maneggevolezza
- facilità d'uso e presenza di software di acquisizione e di gestione dei dati



Operativamente i parametri tecnici più importanti per comprendere la qualità di un laser e poterlo poi confrontare con altri strumenti sono:

1. accuratezza: è il grado di concordanza fra le misure effettuate con lo strumento e la reale dimensione dell'oggetto (misurato con metodi convenzionali). Un sovra-campionamento della superficie aumenta sensibilmente l'accuratezza del rilievo.
2. precisione: è il grado di concordanza tra due o più misure dello stesso punto prese dalla stessa posizione. La precisione è perciò il grado di ripetitività della misura.
3. risoluzione è definita come la più piccola entità distinguibile dal sistema. Dipende dalla dimensione del punto laser, dalla divergenza del raggio, dal rumore del segnale....

3 - TRATTAMENTO DEL DATO LASER

Al termine delle operazioni di acquisizione è possibile procedere al trattamento del dato laser per l'ottenimento del prodotto finale.

Il trattamento del dato laser si divide in due parti:

- Trattamento preliminare: ricerca marker, filtratura, registrazione, georeferenziazione, triangolazione laser
- Creazione del prodotto finale: modello a superfici, ortofoto di precisione, immagine solida

Ogni operazione deve essere progettata e controllata affinché sia possibile ottenere un prodotto finale corretto dell'oggetto.

4 - VANTAGGI

- ✓ Rapidità delle operazioni di campagna (tempo di scansione da alcuni minuti ad alcune decine di minuti)
- ✓ Elevata densità di punti (legata alla distanza, fino a subcentimetrica). I metodi di rilevamento tradizionali hanno la possibilità di misurare un numero di punti di controllo limitato se comparato alle dimensioni di una grande diga
- ✓ Immediata disponibilità dei risultati
- ✓ Possibilità di valutare direttamente in campo la qualità della scansione
- ✓ Post processing più rapido e meno costoso della fotogrammetria



- ✓ Elevata distanza di impiego delle nuove apparecchiature rispetto a quelle tradizionalmente usate in campo architettonico
- ✓ Elevata ripetibilità della misura
- ✓ Non ha bisogno di riflettori di segnale
- ✓ Spettro elettromagnetico nel visibile e oltre
- ✓ Non è dipendente dalle condizioni di luminosità (Possibilità di operare di notte)

5 - SVANTAGGI

- ✓ Prestazioni ridotte in caso di pioggia e nebbia
- ✓ Grandi quantità di dati da trattare rispetto alle tecniche topografiche tradizionali
- ✓ Le possibili applicazioni al monitoraggio di versanti instabili sono limitate ad una distanza inferiore al km
- ✓ Necessità di integrazione con tecniche tradizionali per motivi di georeferenziazione (una rete di inquadramento topografico realizzata con una stazione totale tradizionale utilizzata per determinare le coordinate dei punti di appoggio), completamento di eventuali zone di ombra, per esigenze di esportazione del risultato per rappresentazione con metodi tradizionali
- ✓ Intensità del segnale di ritorno dipendente dall'oggetto
- ✓ Mapping più impegnativo rispetto a un sistema tradizionale
- ✓ l'acquisizione delle informazioni è sequenziale e non istantanea come nella fotogrammetria
- ✓ l'immagine è reale nella fotogrammetria, nel laser scanning è "quasi" un'immagine
- ✓ costo elevato

6 – ESEMPIO DI APPLICAZIONE

Diga di Cancano – monitoraggio strutturale di una grande diga mediante laser scanning terrestre

Il progetto è finalizzato a verificare la possibilità di utilizzare la tecnica del *laser scanning* terrestre nell'ambito del monitoraggio delle deformazioni delle grandi dighe in calcestruzzo.

Questa attività è stata pianificata in cooperazione con A.E.M. S.p.a. Area Produzione1, che ha messo a disposizione una delle proprie dighe (quella del lago di Cancano, nelle vicinanze della famosa località turistica di Bormio in Alta Valtellina) per realizzare un campo prova. Nel corso di questo progetto è stato anche completato un rilievo dell'intera struttura mediante laser scanning terrestre.



Due diversi laser scanner sono stati impiegati nel corso di 3 campagne di misura nel Maggio 2005, nell'Ottobre 2005 e nel Maggio 2006. Uno strumento di lunga portata Riegl LMS-Z420i è stato stazionato in due punti collocati rispettivamente a 200 e 300 m dal paramento di valle della diga; uno strumento Leica HDS 3000 è stato posizionato a distanze più ridotte. Per verificare le misure di spostamento determinate mediante laser scanning, sono stati posizionati 68 target segnalizzati sulla superficie della struttura, la cui posizione tridimensionale rispetto alla rete di inquadramento è stata misurata grazie ad una stazione totale mediante intersezione multipla. L'acquisizione dei dati è stata eseguita in modo da determinare 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 and Pfeifer, 2005). La superficie della diga viene divisa in piccole porzioni, per ciascuna delle quali si stimerebbe una superficie interpolante. 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. 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 che devono essere registrate nello stesso sistema di riferimento.

La diga

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. La diga 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, inclinometri, ecc.) e con misurazioni topografiche periodiche (livellazioni geometriche, reti geodetiche di controllo, collimazioni ottiche). Occorre sottolineare come la disponibilità di altre misure delle deformazioni della



struttura è assai importante per la validazione dei risultati ottenuti nell'ambito della presente ricerca. La morfologia del terreno davanti alla diga è particolarmente adatta per i rilevamenti mediante laser

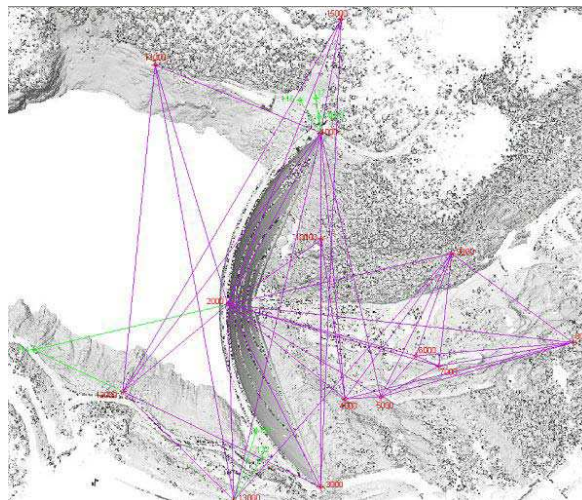


scanning, in quanto la valle assume la forma di un semi-anfiteatro naturale, interrotto ovviamente nella sua parte centrale.

La rete topografica di inquadramento

È stata realizzata e misurata una nuova rete topografica, costituita da 11 vertici principali materializzati mediante chiodi topografici infissi nel suolo in corrispondenza di elementi in cemento. Questa rete definisce il datum topografico locale (GRS). Dal momento che il vertice 1000 è stato scelto in corrispondenza di un punto della rete GPS di raffittimento della Regione Lombardia, la sua quota ortometrica è stata utilizzata come riferimento altimetrico.

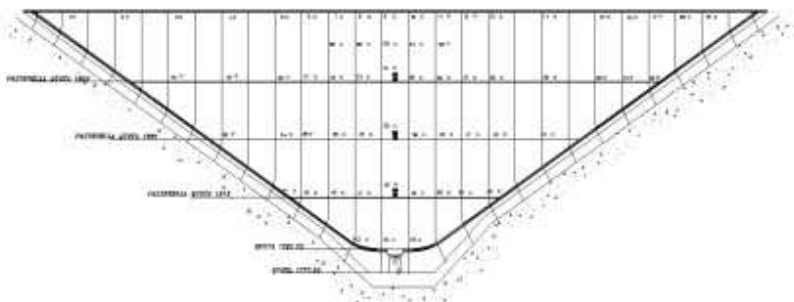
La misurazione della rete topografica di inquadramento è stata condotta nel mese di maggio 2005 grazie ad una stazione totale Leica TCA2003. La compensazione a minimi quadrati delle misure eseguite ha permesso di determinare le coordinate 3D dei punti con uno s.q.m. pari a ± 2 mm in X-Y e ± 3 mm in Z.



Materializzazione dei punti di controllo

I punti di controllo sono stati impiegati per 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 poter validare l'analisi delle deformazioni realizzata a partire dalle misure TLS occorre avere anche altre misurazioni indipendenti da queste. Per questo scopo sono stati posizionati alcuni 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.

Tutti i target (15 GPC+ 68 ChkP) sono stati materializzati nel maggio 2005 mediante dischi in alluminio ($\varnothing=120$ mm) recanti in posizione centrale un'area circolare in materiale retro-riflettente ($\varnothing=100$ 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. Grazie alla elevata riflettività del materiale con cui sono stati ricoperti i target è stato possibile impiegare il distanziometro a misura di fase di cui è dotata la stazione totale Leica TCRA 1203, almeno per i punti esterni alla diga. 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. Questi target sono stati impiegati per la georeferenziazione delle scansioni acquisite con il laser scanner Riegl LMS-Z420i. Altri 14 target adesivi ($\phi=75$ mm) da utilizzarsi con lo strumento Leica HDS 3000 sono stati fissati al paramento della diga limitatamente al periodo di ciascuna campagna di misura. La precisione nella misura di questi target è risultata nell'ordine di ± 4 mm in X-Y e ± 8 mm in Z.

Strumenti laser scanner impiegati

Il rilevamento con laser scanning è stato eseguito con due strumenti a tempo di volo aventi caratteristiche piuttosto diverse. Il primo è uno strumento TLS a lunga portata (long range) modello Riegl LMS-Z420i, il secondo è un laser scanner a media portata Leica HDS 3000. Si riportano le caratteristiche peculiari di questi strumenti.

Strumento	<i>Riegl LMS-Z420i</i>	<i>Leica HDS3000</i>
Velocità di misura (punti/s)	up to 12k	up to 2k
Campo di misura della distanza (m)	2÷1000	1÷100
S.q.m. della singola misura di distanza (mm)	10 \pm 20 p.p.m.	4 @ 50 m
Risoluzione angolare (deg)	0,0025	0,0034
Campo di misura angolare orizz. e vert. (deg)	360x80	360x270
Divergenza del raggio laser (mm)	25 @ 100 m	6 @ 50 m
Lunghezza d'onda (nm)	Infrarosso vicino	532
Dimensioni (mm)	463x210 (HxD)	165x236x215 (DxWxH)
Peso (kg)	14,5	12
Camera CCD integrata	Nikon D100	Interna

Tabella 1



Pianificazione delle campagne di misura

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.

Campagna di misura	Periodo	Quota del livello dell'acqua (m s.l.m.)	Spostamento orizzontale al centro del coronamento (mm)
<i>Maggio 2005</i>	2-5 Mag	1852	- 12
<i>Ottobre 2005</i>	27-28 Ott	1894	- 34
<i>Maggio 2006</i>	8-9 Mag	1842	- 5

Tabella 2

A causa delle scarse precipitazioni nevose verificatesi nell'inverno 2005, il massimo livello dell'acqua nel bacino è rimasto ben al di sotto dei valori medi storici, con la conseguente minor deformazione dell'intera struttura. Per questo motivo, probabilmente verranno realizzate nuove campagne di misura nei mesi di ottobre 2006 e maggio 2007.

Descrizione delle acquisizioni

Scansioni acquisite con Riegl LMS-Z420i

Le scansioni 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. Si riportano alcune caratteristiche delle scansioni.

Scansioni	6000		8000
Tempo di scansione (min)	70		55,6
# totale di punti misurati	7,55M		8,22M
Risoluzioni angolari (deg)	Orizz.	0,014	0,008
	Vert.	0,014	0,007
Densità dei punti (1/cm ²)	Min	0,31	0,25
	Max.	0,14	0,26
Distanza di misura (m)	Min.	148	286
	Max.	215	320
Campo di vista angolare (deg)	Orizz.	37,4	22,4
	Vert.	41,8	21,9
Divergenza del raggio laser (m)	Min.	0,037	0,072
	Max.	0,054	0,080

Tabella 3

La georeferenziazione è stata realizzata sfruttando come GCP i target descritti in precedenza, che sono posizionati nelle vicinanze dei punti di stazione con TLS. La misurazione dei punti di controllo (ChkP) collocati sul paramento di valle è stata impiegata solo per la validazione dei risultati. 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.

Scansioni acquisite con Leica HDS3000



Le scansioni sono state acquisite a partire da 5 punti di stazione, posizionate ad una distanza media variabile da 50 a 120 m rispetto alla diga. Queste stazioni sono state indicate coi codici 100, 200, 300, 400 e 500. L'intera superficie del paramento di valle è stata misurata (di fianco è riportata l'unione delle nuvole di punti acquisite).

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. Dal momento che questi target sono facilmente deteriorabili a causa dell'azione degli agenti atmosferici, essi sono stati posizionati e misurati a partire dalla rete topografica di inquadramento ad ogni campagna di misura. Un numero oscillante tra 6÷8 target sono stati adottati per georeferenziare ciascuna scansione.

Analisi della stabilità della georeferenziazione

La definizione di un sistema di riferimento locale (GRS) risulta essere di fondamentale importanza per l'analisi delle deformazioni di una diga. Nella sperimentazione in corso questo è stato materializzato mediante la rete topografica di inquadramento e, per registrare tutte le scansioni ad esso, si è fatto ricorso all'impiego di GCP. Nel caso del Riegl LMS-Z420i, questi sono stati materializzati con dischi in alluminio ricoperti di materiale retro-riflettente, posizionati in modo permanente attorno ai punti di stazioni 6000 e 8000. Nel caso del Leica HDS 3000, sono stati invece utilizzati alcuni target dedicati che sono stati fissati limitatamente al periodo delle campagne di misura sul paramento della diga.

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 dove i parametri di tutte le roto-traslazioni 3D necessarie per la registrazione delle scansioni nel GRS sono stati ricalcolati con un metodo rigoroso ai minimi quadrati. In questo contesto è stato possibile eseguire anche alcune analisi sulla precisione dei dati, finalizzate a valutare la qualità della georeferenziazione di ciascuna scansione e quindi a verificarne la stabilità alle diverse epoche.

Riegl LMS-Z420i

La georeferenziazione di entrambe le scansioni è stata attuata grazie alla misura di 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 verificare 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 dei dati laser scanning. Gli s.q.m. stimati per i parametri di georeferenziazione sono riportati nella tabella seguente insieme a quelli ottenuti vincolando tutti i ChkP.



S c a n	Camp.	G C P	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
6 0 0 0	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
		43	10,6	3,2	3,4	3,6	9,9	9,9	1,3
8 0 0 0	Maggio 2005	9	6,4	2,8	2,8	3,0	3,8	1,6	1,0
		43	8,8	3,5	3,7	3,8	1,9	1,2	0,8
	Ottobre 2005	10	12,0	5,5	5,6	5,6	5,3	2,1	1,7
		40	8,3	3,4	3,6	3,7	1,4	0,8	0,8
	Maggio 2006	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 4: Precisione stimata per i parametri di georeferenziazione considerando entrambe le configurazioni di vincolo (solo punti esterni alla diga e tutti i punti)

Come si può vedere, 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. Questo fatto è dovuto probabilmente alla presenza di outliers tra i target misurati, che andrebbero analizzati più a fondo e rimossi.

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 seguente).



S c a n	Camp.	Residui sui ChkP (mm)						
		#	media			S.q.m.		
			ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
6 0 0 0	<i>Maggio 2005</i>	39	-14	-7	-4	± 9	± 9	± 9
	<i>Ottobre 2005</i>	31	3	-2	2	± 6	± 7	± 4
	<i>Maggio 2006</i>	30	-2	1	1	± 8	± 13	± 8
8 0 0 0	<i>Maggio 2005</i>	34	-2	-4	-8	± 6	± 12	± 9
	<i>Ottobre 2005</i>	30	-1	-4	9	± 5	± 7	± 8
	<i>Maggio 2006</i>	24	-7	3	-5	± 8	± 10	± 8

Tabella 5

Il primo concerne le medie, che variano tra valori molto bassi (per esempio nel caso delle scansioni 6000 dell'ottobre 2005 e del maggio 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. Questi sono probabilmente dovuti alla variazione dell'angolo di incidenza dei raggi laser rispetto alla superficie retro-riflettente dei target. I problemi illustrati, che meritano di essere studiati in maggior dettaglio nel proseguo della ricerca, 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. Questo fatto dimostra come, se si trascurano alcuni modesti errori dovuti alla georeferenziazione, la precisione nella misura dei target è piuttosto stabile.

Primi risultati del monitoraggio

Attualmente le attività sono ancora in fase di sviluppo e qui vengono presentati soltanto alcuni risultati delle prime analisi. 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. Questo è dovuto all'impossibilità di misurare esattamente nelle diverse sessioni gli stessi punti, a causa dell'imperfezione nel riposizionamento dello strumento e della divergenza del raggio laser (si veda per questo problema Lichti & Gordon, 2004).

Si è quindi pensato di utilizzare una delle tecniche cosiddette "area based" per la valutazione delle deformazioni, in quanto consentirebbe di ridurre parzialmente il rumore delle misure.



Alcuni test sono stati finora eseguiti utilizzando una coppia di scansioni acquisite dal punto 8000 nei mesi di ottobre 2005 e maggio 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 di 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 mezzera. Questo calcolo era richiesto anche dalla presenza di scansioni multiple ("multiscan") in modo da ottenerne una unica per ciascuna epoca. I punti caratterizzati da uno s.q.m. maggiore a ± 1 cm nella misura della distanza sono stati eliminati.

Successivamente sono state ricavate due diverse superfici interpolanti (per un inquadramento su questo argomento si veda Remondino, 2004). 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. In Tabella 6 sono riportate alcune statistiche sulle interpolazioni utilizzate, riguardanti in particolare le differenze generali tra le diverse superfici.

Dataset confrontati	8000 Ott 2005		8000 Mag 2006	
	Media (mm)	S.q.m. (mm)	Media (mm)	S.q.m. (mm)
Multi-scansione ricamp. – mesh triangolare	6	± 3	4	± 2
Mesh triangolare – superf. polinomiale 3D	0,5	± 3	0,4	± 5
Superf. polinomiale 3D – multi-scansione ricamp.	1	± 8	2	± 8

Tabella 6

Come si può osservare, un valore significativo della media si riscontra unicamente nel passaggio tra le scansioni multiple e le mesh triangolari. Negli altri casi le interpolazioni contribuiscono solamente ad aumentare gli s.q.m. delle differenze a causa del filtraggio passa-basso che si verifica.

Al termine delle operazioni di interpolazione sono stati eseguiti 4 diversi confronti:

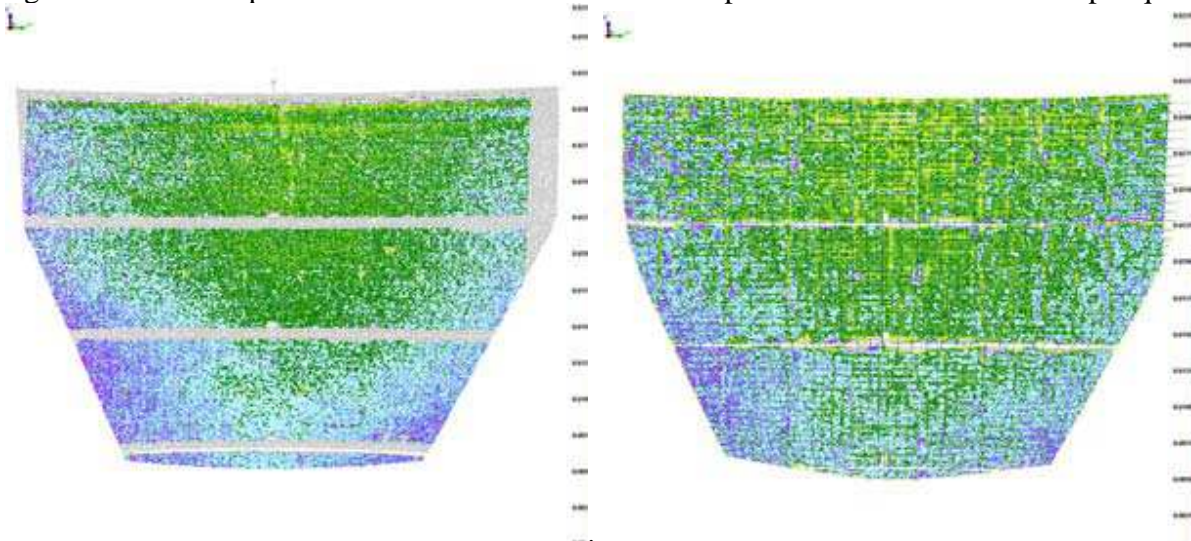
1. *mesh* ricavata dalla scansione dell'ottobre 2005 rispetto alla nuvola di punti del maggio 2006 ricampionata;
2. *superficie polinomiale* dell'ottobre 2005 rispetto alla nuvola di punti del maggio 2006 ricampionata;
3. *mesh* ricavata dalla scansione dell'ottobre 2005 *mesh* ricavata dalla scansione del maggio 2006;
4. *superficie polinomiale* dell'ottobre 2005 rispetto alla *superficie polinomiale* del maggio 2006.

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.

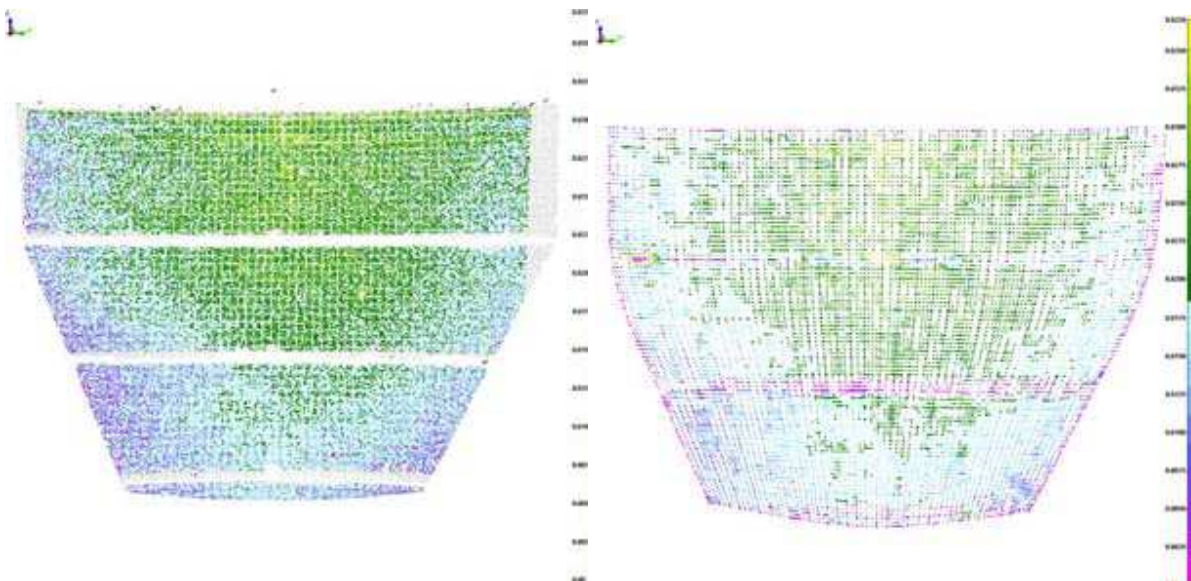
Nella figura seguente sono riportate alcune mappe che mostrano le deformazioni della porzione centrale della diga acquisita dalla stazione 8000 nei mesi di ottobre 2005 e maggio 2006 secondo le diverse tecniche di confronto impiegate. Le deformazioni determinate nel punto centrale del paramento



corrispondono ai valori misurati mediante stazione totale riportati nella Tabella 2. Inoltre, quelle riguardanti l'intero paramento sono in accordo con il comportamento strutturale atteso per questa diga



1 - Mesh vs nuvola di punti ricamp (# di punti: 71758) 2 – Superf. Polinom. vs nuvola di punti ricamp (# di punti: 65550)



3 - Mesh vs mesh(# di punti: 37674)

4 - Superf. Polinom. vs superf. Polinom. (# di punti: 20971)

CONSIDERAZIONI FINALI E SVILUPPI FUTURI

I risultati illustrati mostrano come l'utilizzo delle tecniche TLS 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 mappe delle deformazioni del paramento frontale della diga. Nelle figure precedenti si possono osservare alcune di queste mappe, derivate dal confronto di due nuvole di punti acquisite con laser scanning in epoche diverse. 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. Per dovere di completezza occorre ricordare che analoghe mappe potrebbero essere ottenute anche grazie alle tecniche SAR terrestri (Ground Based SAR - Tarchi et al., 1999), anche se l'utilizzo del TLS è maggiormente operativo. Sebbene i radar terrestri consentirebbero di eseguire misure delle deformazioni più accurate (è possibile infatti ottenere una precisione nella misura della distanza anche inferiore a ± 1 mm), essi richiedono uno stazionamento permanente della strumentazione. In caso l'acquisizione dei dati venga interrotta, la massima precisione nella misura delle deformazioni non può più essere raggiunta. Al contrario, le tecniche TLS possono essere applicate anche in assenza di continuità nel posizionamento dello strumento, essendo sufficiente la presenza di un set di GCP permanenti che consentano di inquadrare sempre i dati all'interno dello stesso sistema di riferimento. Questo obiettivo può essere raggiunto con la materializzazione di target permanenti (come è stato fatto per il Riegl LMS-Z420i nel corso di questo progetto) oppure posizionando nuovi target al momento di eseguire una scansione e rideterminandoli a partire dalla rete di inquadramento. Un altro elemento da sottolineare è costituito dalla grande distanza di acquisizione dallo scanner alla quale è possibile operare, che può raggiungere anche i 300 m senza particolari perdite di accuratezza. Questo aspetto è particolarmente importante, dal momento che in molti siti può essere difficile reperire le posizioni in cui stazionare con lo strumento a causa della complessità della topografia del terreno. 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. I risultati riportati al paragrafo di analisi della stabilità della georeferenziazione mostrano infatti una grande variabilità nella stessa, che in apparenza sembra essere indipendente dall'influenza di fattori esterni. 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. Fino ad ora sono state applicate soltanto soluzioni basate sulle funzioni implementate in software commerciali, ma si ritiene opportuno provare ad applicare anche metodi di interpolazione più raffinati. 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.

7 - CAMPI DI APPLICAZIONE

- Definizione di modelli 3D laser molto dettagliati per l'implementazione di modelli matematici agli elementi finiti
- Rilievo topografico: calcolo aree, volumi, tracciamento sezioni, interpolazione isoipse; confronto tra scansioni eseguite in epoche diverse per il monitoraggio; ambito glaciologico; rilievo di gallerie esistenti; cave a cielo aperto
- Studio di pareti rocciose per le quali l'immagine solida permette di determinare automaticamente gli orientamenti dei piani di frattura visibili sulla parete e le misure di persistenza, spaziatura e apertura delle discontinuità (evitando i classici stendimenti geomeccanici con i relativi rilievi manuali per cui è richiesto l'impiego di personale specializzato con esperienza alpinistica e un notevole impiego di tempo);
- Utilizzo dell'immagine solida nel campo architettonico e del rilevamento di porzioni di territorio in modo che si possa: determinare in tempo reale la posizione 3D di qualsiasi punto rappresentato, eseguire misure tridimensionali corrette (distanza, aree, volumi, angoli) selezionando solo alcuni punti sull'immagine, estrarre profili, sezioni e piani usando semplici funzioni di disegni CAD. Le informazioni metriche estraibili dall'immagine solida sono accessibili anche ad utenti non esperti di topografia e fotogrammetria.
- Differenziazione tra materiali in base al valore dell'indice di riflettività rilevato: natura dei materiali, valutazione umidità e grado di alterazione superficiale, valutazione caratteristiche petrofisiche della superficie investigata
- APPLICAZIONI AL MONITORAGGIO : Allo stato attuale è da rilevare che la strumentazione laser scanner non permette di apprezzare e valutare con assoluta certezza movimenti di entità inferiore alle precisioni del metodo di rilievo e di trattamento dati. Tale limite può non essere trascurabile in condizioni in cui i movimenti significano fenomeni geologici importanti ed irreversibili (tipico degli ammassi rocciosi in frana) o derive negli spostamenti della diga. Come detto al paragrafo precedente, l'impiego che nel futuro le tecniche laser scanning potrebbero avere è quello del monitoraggio periodico, in modo da raffinare le analisi computazionali, fino ad oggi realizzabili considerando soltanto la geometria di progetto della struttura.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- *La Tecnica del Laser Scanning Terrestre – principi di funzionamento e tecniche di acquisizione* – Leandro Bornaz Udine 24-26 novembre 2004
- *Introduzione ai sistemi Laser Scanner* – CODEVINTEC ITALIANA Srl
- *Applicazioni ambientali delle tecniche Laser Scanner Terrestri* – A.Biasion, L. Bornaz, F. Rinaudo – DITAG Politecnico di Torino
- *Monitoraggio di eventi franosi in roccia con tecniche laser scanner* - A.Biasion, L. Bornaz, F. Rinaudo – Dipartimento di Georisorse e Territorio Politecnico di Torino
- *L'immagine solida: una nuova metodologia per l'indagine di modelli 3D* - L. Bornaz, S. Dequal - Dipartimento di Georisorse e Territorio Politecnico di Torino
- *Il rilevamento geometrico di una grande diga mediante laser scanning terrestre* – M. Alba, A. Giussani, F. Roncoroni, M. Scaioni, P. Valgoi
- *Monitoraggio strutturale din una grande diga mediante laser scanning terrestre* - M. Alba, L. Fregonesi, F. Prandi, M. Scaioni, - D.I.I.A.R. Politecnico di Milano e P. Valgoi AEM SpA Milano
- *Il laser scanner* – Giovanni Re dal Sifet di Palermo 2005
- *Rilievo con tecnica laser scanning del paramen di valle della diga di Alto Mora. Prima campagna di misura* – A. Tamburini, A.U. Bariletti CESI STA per Italgen SpA
- *Tecniche di monitoraggio applicate alla stabilità dei versanti* – SUPSI Lugano 16/02/06 ISMES CESI
- *“Problemi di georeferenziazione, calcoli volumetrici, rappresentazione ed integrazione del rilevamento con le tecniche gps e classiche esempi tratti da applicazioni glaciologiche d'alta quota”* M. Gelmini Dal convegno: *“Il laser scanner e il territorio: applicazioni, metodologie operative, potenzialità del rilevamento con laser scanner terrestre”* –20 giugno 2005 Università degli studi di Brescia
- *Gestione ed elaborazione dei dati laser. Problemi, metodi e soluzioni applicative. Esempi tratti da esperienze di rilevamento in zone estrattive a cielo aperto, pareti rocciose, zone franose* - Matteo Sgrenzaroli Inn-tec Srl Dal convegno: *“Il laser scanner e il territorio: applicazioni, metodologie operative, potenzialità del rilevamento con laser scanner terrestre”* –20 giugno 2005 Università degli studi di Brescia
- *Fotogrammetria digitale e 3D laser scanning: una possibile integrazione tra i metodi di rilievo* – Marco Dubbini, Antonio Zanutta Distart Università di Bologna