

REPORT FINALE

AZIONE 2.4.b

Sistemi di monitoraggio

Progetto transfrontaliero Italia-Francia ALCOTRA  
*Projet transfrontalier Italie-France ALCOTRA*



RISBA

RISCHIO DEGLI SBARRAMENTI ARTIFICIALI  
*RISQUES DES BARRAGES*



# Sistemi di monitoraggio

G. Ventura<sup>1</sup>, E. Suozzi<sup>2</sup> <sup>(2)</sup>, A. Antonietti <sup>(2)</sup>,  
B. Chiaia<sup>1</sup>, B. Frigo<sup>1</sup>

## 1. Premessa

Il progetto di grandi sbarramenti include normalmente sistemi di monitoraggio continuo atti a segnalare comportamenti anomali della struttura del corpo diga. Tuttavia, esiste un grandissimo numero di sbarramenti di minore importanza in cui i costi di sistemi tradizionali possono risultare elevati e per i quali comunemente si utilizzano verifiche periodiche di tipo visuale e/o topografico. In questo capitolo si richiameranno brevemente i meccanismi di crisi più frequenti per le più comuni tipologie di sbarramenti (*Potential Failure Modes*), e si indicheranno tecniche di monitoraggio atte a rivelarne l'innescò, con particolare riferimento a sbarramenti attualmente provvisti di monitoraggio continuo.

All'interno di questo quadro bisogna tenere presente che sistemi di monitoraggio basati su sensori puntuali, molto efficaci quando si riesca a localizzare molto bene da un punto di vista spaziale il meccanismo di crisi, possono trovare limitata applicabilità per i costi connessi al loro cablaggio e per la loro intrinseca rigidità nell'aggiunta di ulteriori sensori e punti di misura. Ad esempio, in dighe in calcestruzzo trovano grande ed efficace applicazione sia inclinometri che misuratori di spostamento relativo tra i vari conci del corpo diga. Tuttavia, nel caso di sbarramenti in terra o piccoli sbarramenti in muratura o calcestruzzo, l'innescò della crisi dello sbarramento può interessare un punto qualsiasi dell'opera, e risulta quindi difficile individuare un

---

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica  
Politecnico di Torino  
Corso Duca degli Abruzzi, 24 – 10129 Torino (IT)

<sup>2</sup> ISE-NET s.r.l. – Innovative Solution for the Environment, Torino (IT)

singolo punto da monitorare. In tali situazioni viene descritta una tecnica di monitoraggio che è stata sviluppata all'interno del presente progetto e di cui è stato eseguito un test preliminare sullo sbarramento valdostano di Guillemore.

## 1.1 Sbarramenti in terra

Le modalità di crisi più comune degli sbarramenti in terra sono:

- tracimazione;
- fenomeni di filtrazione;
- erosione interna o della fondazione;

Si possono distinguere, per quanto riguarda gli effetti delle differenti modalità di crisi, due classi di meccanismi. La prima genera venute d'acqua sul paramento di valle o al piede dello sbarramento. La seconda altera la geometria del corpo diga. Le Figg. 1 e 2 illustrano le due classi.

La prima classe di fenomeni di crisi è meglio individuata intercettando e canalizzando le venute d'acqua al piede dello sbarramento e misurandone la portata, il cui incremento nel tempo può essere quindi assunto come indice di crisi. Questo sistema trova la sua naturale integrazione con la misurazione del livello dell'invaso al fine di evitare il superamento del livello massimo e la tracimazione dell'opera.



Figura 1. Meccanismo di crisi della diga Tunbridge, Tasmania, Australia (geoengineer.org Website)

Per quanto riguarda la seconda classe di fenomeni essi possono essere monitorati:

- con livellazioni topografiche. Questo metodo, sicuramente efficace, non richiede alcuna installazione permanente sull'opera. Tuttavia la sua limitazione nasce dai costi elevati, dal lungo intervallo di tempo intercorrente tra un rilievo ed il successivo e dall'impossibilità di effettuarlo in condizioni climatiche avverse. Inoltre, non consente di avere un immediato quadro della situazione a valle di eventi che richiedono elevato livello di attenzione;
- con inclinometri collocati su aste infisse nel corpo diga. La principale limitazione di questo metodo nasce dall'elevato numero di sensori che bisogna disporre lungo il corpo diga;
- con l'utilizzo di laser scanner terrestre. Questa tecnica, molto efficace, consente di avere una rappresentazione puntuale delle variazioni di geometria del corpo diga. Fornisce un set di dati molto ricco ma amplifica tutti gli inconvenienti evidenziati per i rilievi topografici. Sarebbe tuttavia certamente utile avere una rappresentazione laser scanner georeferenziata di ogni sbarramento da utilizzare come base di analisi qualora altri sistemi di monitoraggio segnalassero situazioni di attenzione.
- con il rilievo laser della distanza di punti prefissati dello sbarramento. Tale tecnica verrà discussa separatamente nel seguito.

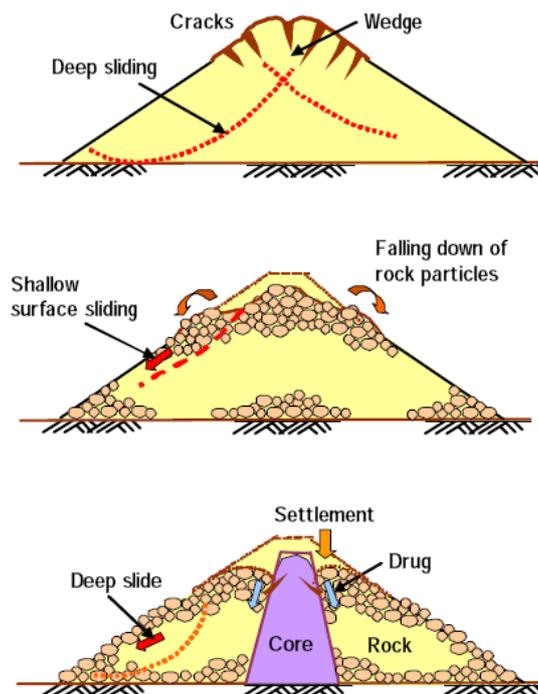


Figura 2 Meccanismi di crisi con alterazione della geometria del corpo diga [1].

## 1.2 Sbarramenti in calcestruzzo

Escludendo problematiche legate a difetti di costruzione che si manifestano subito a valle della costruzione delle opere, le modalità di crisi più comuni degli sbarramenti in calcestruzzo o muratura sono generalmente imputabili a:

- meccanismi di ribaltamento locale o globale;
- problemi di stabilità delle strutture di fondazione, talvolta anche legati a fenomeni di sifonamento;
- venute d'acqua localizzate.

Mentre per quanto riguarda le venute d'acqua può evidenziarsi quanto già riportato a proposito degli sbarramenti in terra, i meccanismi di ribaltamento o la stabilità delle strutture di fondazione si manifestano attraverso spostamenti e rotazioni di parti del corpo diga, che possono anche essere significativi. I sistemi di monitoraggio raccomandati sono simili a quelli visti per le dighe in terra, con il vantaggio che le dighe in calcestruzzo presentano spesso giunti che suddividono la diga in un insieme di corpi rigidi, semplificando così il sistema di monitoraggio. Comunemente si impiegano:

- rilievi topografici periodici;
- inclinometri per la verifica di meccanismi di rotazione da corpo rigido;
- misuratori di spostamento relativo tra i blocchi costituenti la diga.

Per quanto riguarda la strumentazione topografica si rimanda a quanto già detto per gli sbarramenti in terra. Sulla sensoristica è necessario prestare particolare attenzione alla stabilità nel tempo della misura dei sensori, che ad esempio può essere scarsa in alcune tipologie di inclinometri a basso costo.

Come prima osservato, l'installazione di nuova sensoristica in sbarramenti esistenti può avere un costo significativo per l'estensione dei cablaggi necessari e le difficoltà pratiche di installazione. Poiché tuttavia la stragrande maggioranza dei meccanismi di crisi è accompagnata dallo sviluppo di spostamenti significativi, il metodo più adeguato per il controllo degli sbarramenti appare quello di misurare lo spostamento di punti prefissati. Tale misura può essere eseguita senza la necessità di installazioni permanenti con strumentazione topografica o con laser scanner, anche se con le considerazioni prima evidenziate. Il metodo alternativo sviluppato all'interno del progetto sarà introdotto nel paragrafo seguente e consente il monitoraggio continuo degli spostamenti di punti prefissati.

### 1.3 Rilievo laser di punti prefissati

L'analisi PFMA eseguita all'interno del progetto mostra che una grandissima parte dei meccanismi di crisi degli sbarramenti ha, come precursore, il manifestarsi di spostamenti o variazioni di geometria del corpo diga. Tali variazioni sono certamente misurabili attraverso battute topografiche o sistemi di scansione laser commerciali. Il problema di queste tecniche è che richiedono tempi e costi elevati, e non sono in grado di fornire un quadro immediato ed ingegneristico della situazione dello sbarramento.

Partendo da queste considerazioni si è sviluppato il concetto di uno strumento per il controllo della variazione di posizione di punti assegnati rispetto ad una posizione fissa. Il principio è simile a quello di un laser scanner, ma il concetto è radicalmente differente. Mentre nelle scansioni laser viene digitalizzato tutto lo spazio circostante lo strumento (generando una quantità di dati molto elevata e di complessa post-elaborazione), nel prototipo di apparecchiatura sviluppata lo strumento viene installato permanentemente in sito e misura la propria distanza da punti preassegnati.



Figura 3. Prototipo del sistema di monitoraggio laser sviluppato nel progetto.

Viene calcolata quindi in continuo la differenza tra la prima lettura e le successive letture nel tempo, ottenendo grafici della variazione di posizione dei punti assegnati. In questo modo la quantità di dati generata è molto piccola e di immediata interpretazione ingegneristica. Il prototipo di strumento è costituito da una unità di puntamento e da un distanziometro laser, controllati da un computer in cui è stato caricato un software appositamente sviluppato (Fig. 3).

Il prototipo del sistema di monitoraggio è stato testato presso lo sbarramento di Guillemore in Valle d'Aosta (Fig. 4). A parte alcune interferenze di lettura dovute all'incidenza della luce solare sulle lenti dell'unità laser, i rilevamenti su 9 punti dello sbarramento dal fabbricato di guardia immediatamente adiacente sono apparsi abbastanza stabili nel tempo, Figura 5. I punti erano distanti da 30 m a 60 m dallo strumento, su superfici anche fortemente inclinate rispetto alla direzione di misura. Sebbene i primi risultati siano molto promettenti, è da verificare l'andamento nel tempo delle letture su intervalli di osservazione più ampi, per valutare l'influenza di altri fattori quali, ad esempio, la temperatura.



Figura 4. Sbarramento di Guillemore in Valle d'Aosta.

Il prototipo e la relativa metodologia mostrano quindi interessanti potenzialità, sia per la semplicità di installazione della strumentazione e dell'immediatezza fisica dei dati acquisiti, sia per il suo potenzialmente ampio campo di applicazione. Infatti lo strumento, non richiedendo targets, può trovare utilizzo non solo su sbarramenti in calcestruzzo, muratura o terra, ma anche su ammassi rocciosi immediatamente sovrastanti gli invasi.

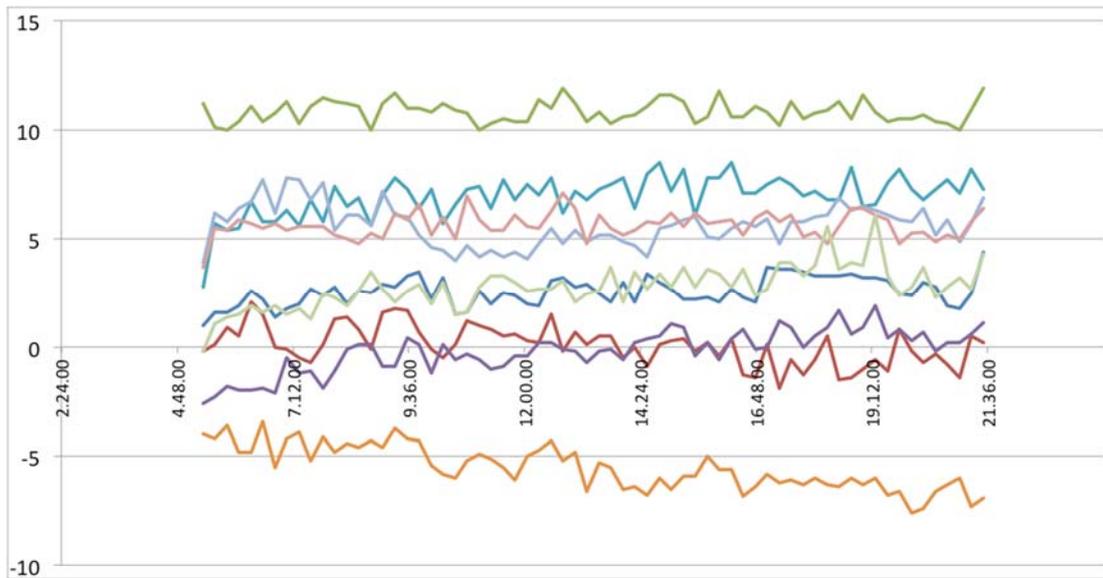


Figura 5. Andamento nel tempo delle letture (spostamenti) eseguite sullo sbarramento valdostano di Guillemore.

## 1.4 Rilievo laser scanner

Al fine di valutare l'efficacia e la celerità, dell'applicazione di tecniche laser scanner terrestri e fotogrammetriche, per la ricostruzione delle caratteristiche geometriche degli invasi si è effettuato un test sull'invaso Ivery sito nel Comune di Pont Saint Martin (Fig. 6).

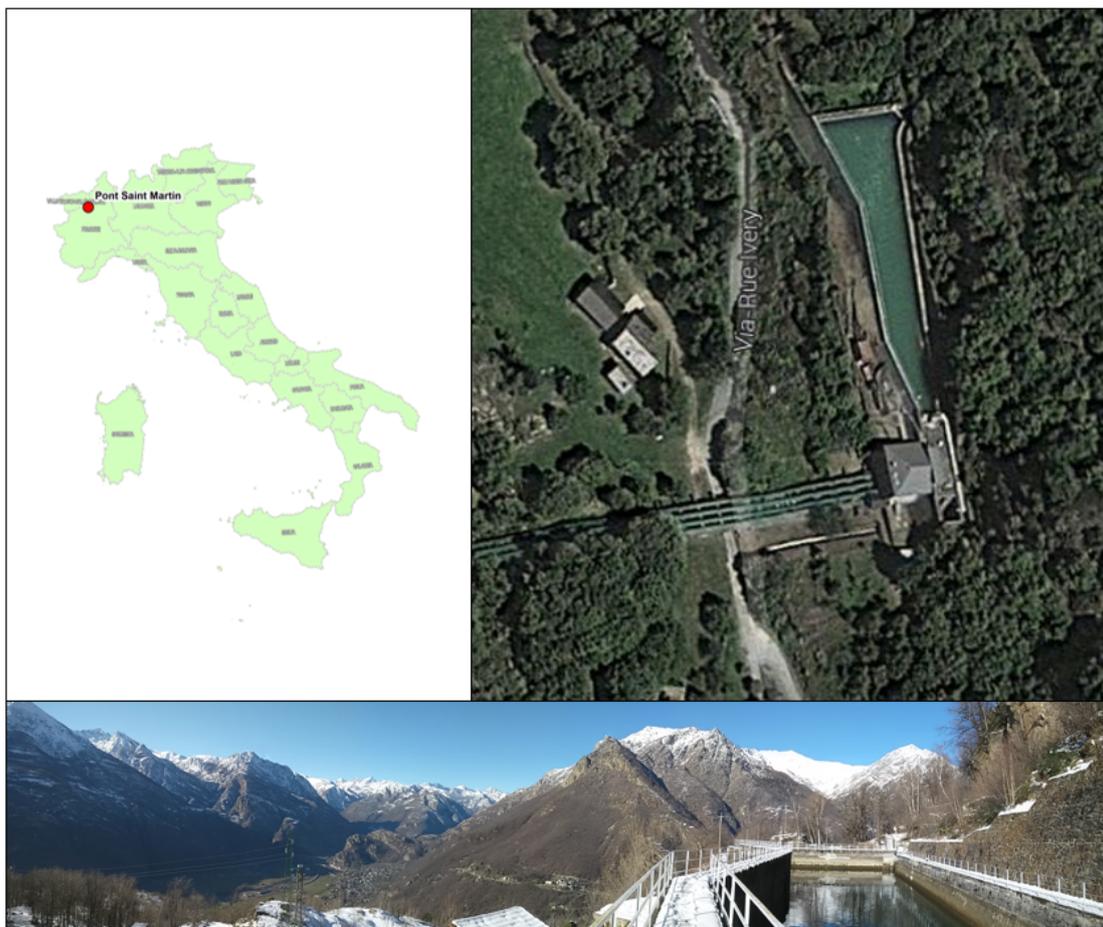


Figura 6. Inquadramento geografico dell'area di test.

Per l'esecuzione di tali rilievi la Ise-Net s.r.l. ha utilizzato un laser scanner terrestre (Riegl – VZ 4000), Camera Reflex Canon EOS 70D con obiettivo Canon EF-S 18-135mm f/3.5-5.6 IS ed un ricevitore GNSS a tripla frequenza (Leica GS25).

Durante il rilievo sono state eseguite n°6 scansioni: n°3 scansioni hanno interessato la parte alta dell'invaso permettendo un ricoprimento del lato ovest (sia interno, sia esterno) e dei muri interni dell'invaso; n°2 scansioni sul lato esterno del manufatto rivolto a sud; n°1 scansione dal prato antistante il muro dell'invaso (posto ad una distanza stimata di 300 metri e a quota inferiore rispetto all' oggetto di studio di circa

100 metri) per rilevare le zone cieche non ottenibili a distanza ravvicinata vista la complessità e la morfologia del terreno.

Una volta acquisite le diverse scansioni è stato necessario, in fase di post-elaborazione, eseguire delle operazioni di pulizia e filtraggio della nuvola di punti così da eliminare sia il rumore presente sia la coltre vegetativa in modo da poter riconoscere nel dettaglio le geometrie costruttive dell'opera [2].

Per la parte interna dell'invaso è stato eseguito anche un rilievo fotogrammetrico [3] il quale ha permesso, mediante elaborazioni successive quali filtraggio della nuvola ed allineamento dei diversi fotogrammi, di ricostruire le geometrie delle parti acquisite.

La georeferenziazione dei rilievi è stata effettuata nel sistema di riferimento UTM-ED50. In particolare, al fine di ottenere un'elevata accuratezza nella collocazione spaziale del rilievo sono stati acquisiti con accuratezza centimetrica, mediante l'uso del ricevitore GNSS in modalità RTK [4], una serie di punti presenti in situ e quindi a loro volta presenti all'interno delle nuvole di punti. Tali punti consistono in: spigoli di muretti, pali, prismi ed elementi fissi in loco.

Il rilievo laser scanner (Fig. 7) ha permesso di ricostruire per l'intero vaso il modello digitale dello stesso, sul quale è possibile, con accuratezza centimetrica, effettuare le misurazioni di interesse.

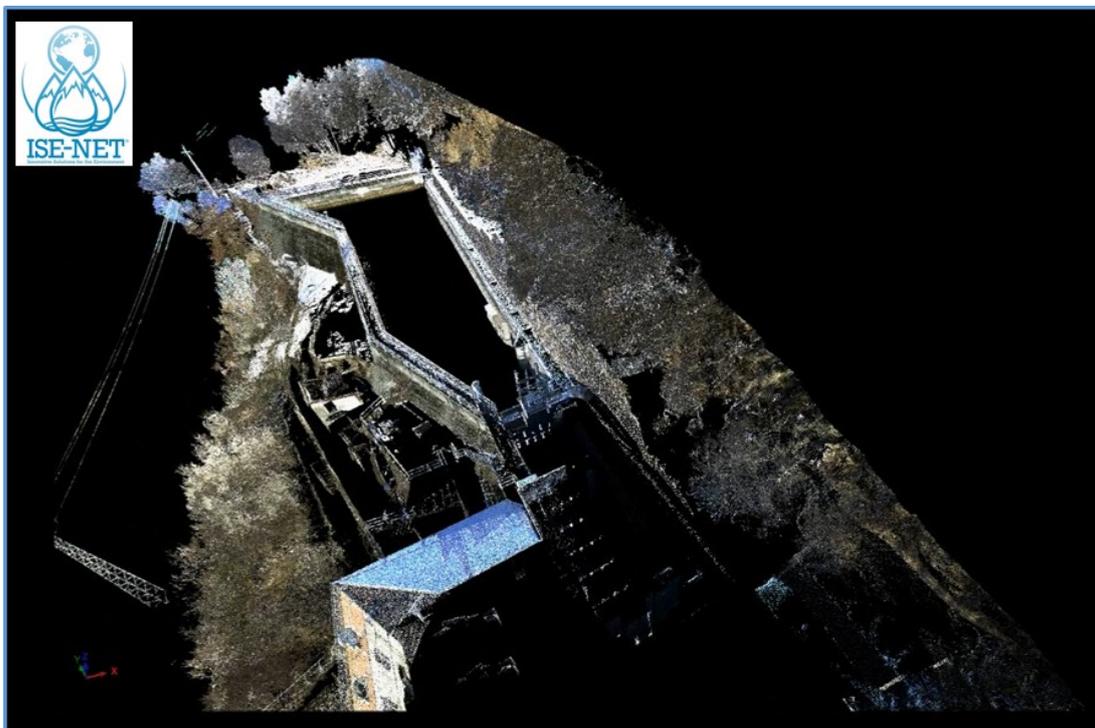


Figura 7. Risultato rilievo laser scanner terrestre.

Mentre, il rilievo fotogrammetrico (Fig. 8) eseguito solo sulla parte interna dello stesso ha permesso di ricostruire un modello digitale della parte interna dell'invaso.

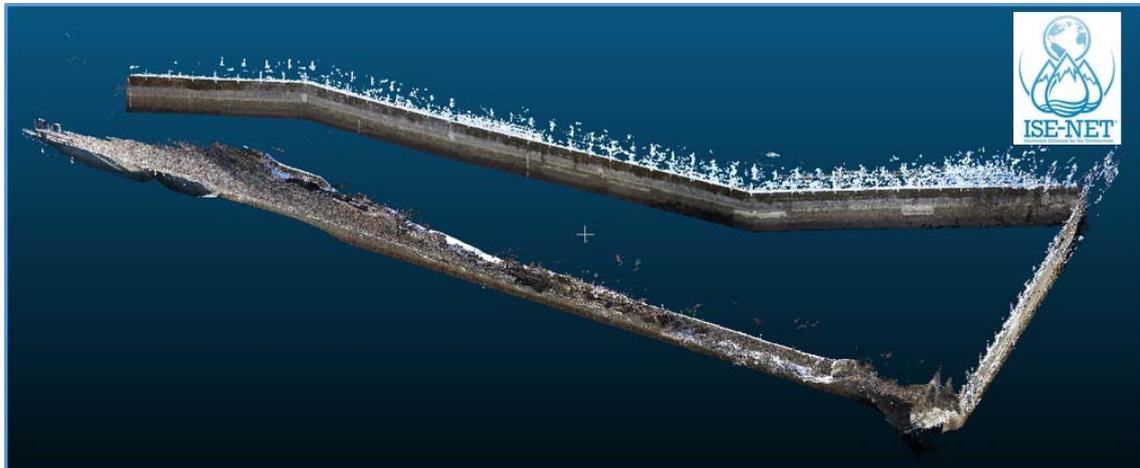


Figura 8. Risultato rilievo fotogrammetrico.

Il raffronto tra le tecniche analizzate in questo paragrafo porta alle seguenti considerazioni:

- L'utilizzo di tecniche laser scanner e fotogrammetriche consente in poco tempo di acquisire le geometrie delle infrastrutture;
- È possibile integrare le nuvole di punti provenienti da diversa strumentazione per evitare mancanze di dati dovute a punti in ombra rispetto alla posizione di acquisizione;
- Utilizzando tecniche e ricevitori GNSS è possibile georiferire con precisione centimetrica i rilievi eseguiti;
- Una volta acquisita la struttura nel suo complesso (laser scanner) è possibile eseguire indagini di dettaglio (fotogrammetria) per contenere i costi del monitoraggio.

## 1.5 Bibliografia essenziale

[1] Narita K., 2000, Design and Construction of Embankment Dams, Notes of Advanced Course in soil mechanics, Aichi Institute of Technology, Japan

[2] Boeder V., Kersten T.P., Hesse C., Thies T. & Sauer A. (2010) - Initial experience with the integration of a terrestrial laser scanner into the mobile hydrographic multi sensor system on a ship. ISPRS Istanbul Workshop 2010 on Modeling of optical airborne and spaceborne Sensors, WG I/4, Oct. 11-13, IAPRS Vol. XXXVIII, part 1/W17.

[3] Kersten. P. (2007) - Virtual Reality Model of the Northern Sluice of the Ancient Dam in Marib/Yemen by Combination of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Archaeological Applications – International Journal of Architectural Computing, 5(2), 340-354, doi: 10.1260/1478-0771.5.2.340.

[4] Aguilera D.G., Lahoz J.G., Sánchez J. (2008) - New Approach for Structural Monitoring of Large Dams with a Three-Dimensional Laser Scanner – Sensors, 8(9), 5866-5883, doi:10.3390/s8095866.