



Sistema automatico di misura per ponti, viadotti e binari ferroviari con l'impiego di elettrolivelle e/o profilometro

Agisco ha recentemente sviluppato e collaudato un sistema che permette il calcolo, in tempo reale, delle deformate di strutture che si sviluppino in una dimensione predominante (quali ponti, viadotti, linee ferroviarie etc. etc.) durante la fase di costruzione, in esercizio o sottoposte a collaudo statico.



Fig. 1 – Elettrolivelle lungo un ponte durante una campagna di prove

Il sistema di misura, semplice ed innovativo, si basa su sensori angolari, denominati *elettrolivelle*, estremamente stabili e precisi che vengono disposti lungo allineamenti di cui si vuole conoscere la deformata.

L'allineamento principale del sistema di sensori coincide con l'asse dell'opera. E' possibile installare sensori anche in senso trasversale per controllare rotazioni trasversali del manufatto.



Fig. 2 – Elettrolivelle su traversine ferroviarie

Ad esempio, nel caso di un ponte, campionando le rotazioni puntuali della struttura con sufficiente intervallo (tipicamente un sensore ogni 5-10 m), grazie al software di elaborazione sviluppato da Agisco e chiamato "ECLIPSE", è possibile, in tempo reale, conoscere non solo la freccia massima di deformazione ed i cedimenti alle pile ed alle mezzerie, ma la ricostruzione di tutto il profilo dell'opera lungo l'allineamento.

Per questo sistema è stata recentemente depositata domanda di brevetto.

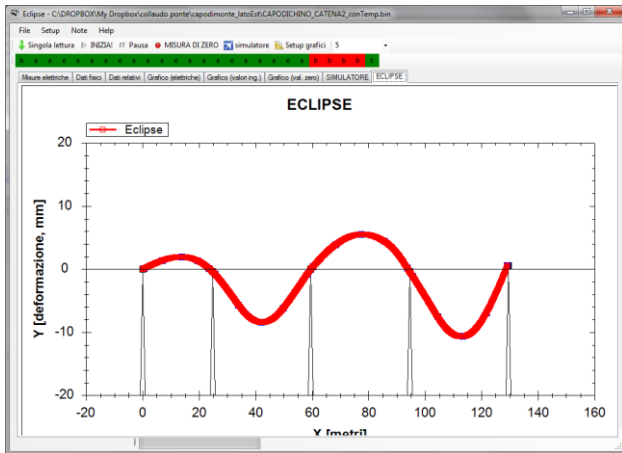


Fig. 3 – Esempio di deformata durante le prove al viadotto Sellero

Condizione fondamentale per la correttezza della misura è che sensori e struttura monitorata siano perfettamente solidali.

Per questo scopo Agisco ha sviluppato e realizzato per i propri sensori di rotazione appositi supporti che permettono un fissaggio sicuro dei sensori alla struttura da monitorare che al contempo ne permette una più semplice e rapida installazione. Per strutture di tipo particolare, non da ultimo strutture in mattoni, Agisco ha sviluppato una tipologia di supporto che permette di utilizzare basi di misura di notevole lunghezza (anche qualche metro) con lo

scopo di effettuare la misura su basi lunghe e significative senza risentire delle deformazioni di tipo termico del supporto del sensore.

I sensori angolari Agisco, come già detto, sono strumenti molto sensibili e precisi. Essi consentono infatti una precisione dell'ordine del millesimo di grado sessagesimale disponendo di una sensibilità 10 volte superiore.

Tutti i sensori di rotazione Agisco sono dotati di sensore di temperatura interno per il controllo e l'eventuale compensazione degli effetti termici.

Essi sono anche costruiti in maniera da poter sopportare continue accelerazioni superiori a 10g il che li rende adatti per installazioni permanenti su binari ferroviari o nelle loro vicinanze. Essi sono altresì costruiti per essere installati permanentemente in acqua in pressione oltre 10bar.

I misuratori di rotazione sono collegati via cavo, o mediante l'impiego di soluzioni wireless, a una o più apparecchiature di misura a loro volta collegate con un PC locale o remoto per il trasferimento dei dati misurati e per il calcolo della deformata della struttura.

Il software di gestione e scarico dati denominato ECLIPSE, è stato implementato appositamente per prove di questo tipo e consente la visualizzazione, memorizzazione ed interpretazione dei dati in tempo reale attraverso un interfaccia grafica semplice ed intuitiva.



Fig. 4-5 – Elettrolivelle lungo un lato del viadotto durante le misure



E' possibile configurare il programma in modo da evidenziare la struttura sotto controllo e la disposizione dei sensori. In tal modo è possibile rappresentare la deformata misurata sovrapposta alla strumentazione grafica della struttura con evidenziate, ad esempio, le relative pile.(Fig. 3).



Fig. 6-7 – Tabelle e grafici rappresentati da ECLIPSE

La schermata principale del software consente infatti la visualizzazione in tempo reale dei dati acquisiti sia in unità fisiche che ingegneristiche.

Con un semplice click è possibile, anche durante le letture, senza quindi dover interrompere le misure, visualizzare grafici che si aggiornano in tempo reale con i dati acquisiti e che rappresentano i valori letti e la deformata calcolata grazie all'applicativo "ECLIPSE" (Elastic Computed Line Intelligent Processing Software).

Il software "ECLIPSE" per l'elaborazione dei dati rotazionali è infatti già incorporato nel software di gestione e scarico dei dati. Esso ricostruisce la deformata a partire dai dati di rotazione sfruttando i principi della linea elastica ed utilizzando una tecnica di interpolazione polinomiale a tratti per risolvere l'equazione della curva per punti. E' estremamente versatile ed è impiegato, per esempio, anche per il calcolo di deformate inclinometriche.

La precisione ottenuta dal sistema nel suo complesso è dell'ordine del decimo di millimetro.

Il sistema di misura è stato testato ed utilizzato per prove di carico su rilevati ferroviari in Sardegna lungo la linea Cagliari-Golfo Aranci, sul viadotto Cattinara (autostrada Milano-Trieste), su due viadotti sulla SS 42 nella zona di Capo di Ponte (Brescia) oltre che per il monitoraggio di molte altre strutture quali linee ferroviarie ed edifici a ridosso di scavi.

Nel caso dei due viadotti nella zona di Capo di Ponte – Sellero e Berzo-Demo – sono state realizzate due linee d'acquisizione dati poste ai lati di entrambi.



Fig. 8 – Esempio di due data-loggers distinti con acquisizioni in tempo reale

Si analizzerà nel dettaglio il caso del viadotto Sellero, lungo 135 metri in cemento armato precompresso e 4 campate di lunghezza pari a 25 e 35 m.



Fig. 9-10 – Viadotto Sellero durante una prova di carico

Lungo ogni lato del ponte sono stati posizionati 20 sensori collegati a due unità di acquisizione ed elaborazione separate. La lettura dei dati del sistema di acquisizione è avvenuta praticamente in tempo reale. Il Direttore della prova ha potuto confrontare in diretta i risultati degli estensimetri posizionati, ove possibile, sotto le campate ravvisando differenze generalmente inferiori a qualche decimo di millimetro. (Fig. 8)

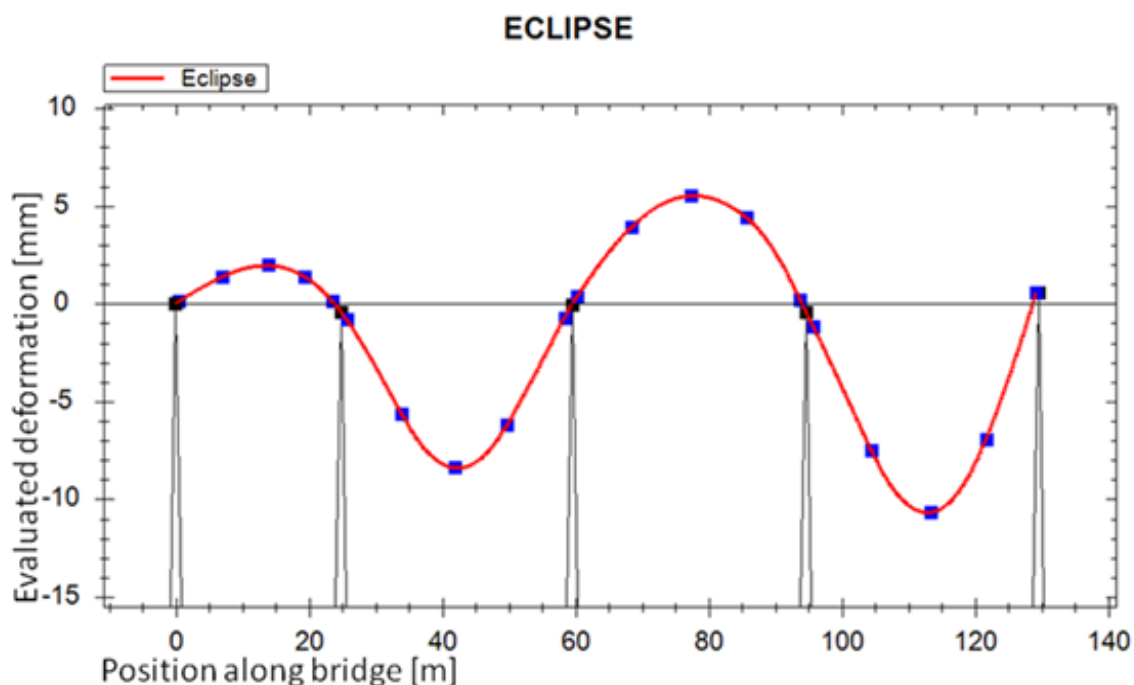
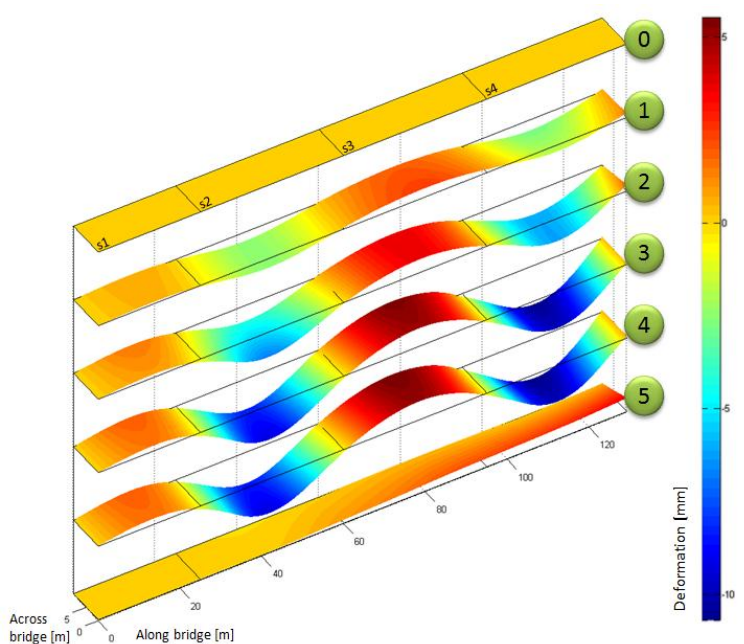


Fig. 11 – Viadotto Sellero: deformata durante la prova di carico. I punti blu rappresentano la posizione delle elettrolivelle

Nel caso del viadotto Sellero le elettrolivelle sono state posizionate come riportato con marker blu in figura 11 nel numero di 5 per campata. Nei pressi delle pile (evidenziate in nero) sono state posizionate due elettrolivelle a distanza di circa un metro dall'asse delle



stesse.

La possibilità di installare due allineamenti di strumenti, oltre a permettere un transitto rapido e senza intralci dei mezzi e delle persone, ha permesso di dare anche una stima dell'inclinazione trasversale del ponte a seguito del caricamento non simmetrico del viadotto (Vedi figure 12 e 13).

Come risulta evidente nella fase 2 del grafico seguente, il viadotto ha subito una deformazione maggiore sul lato ove sono presenti i camion. (Vedi figure 13 e 15).

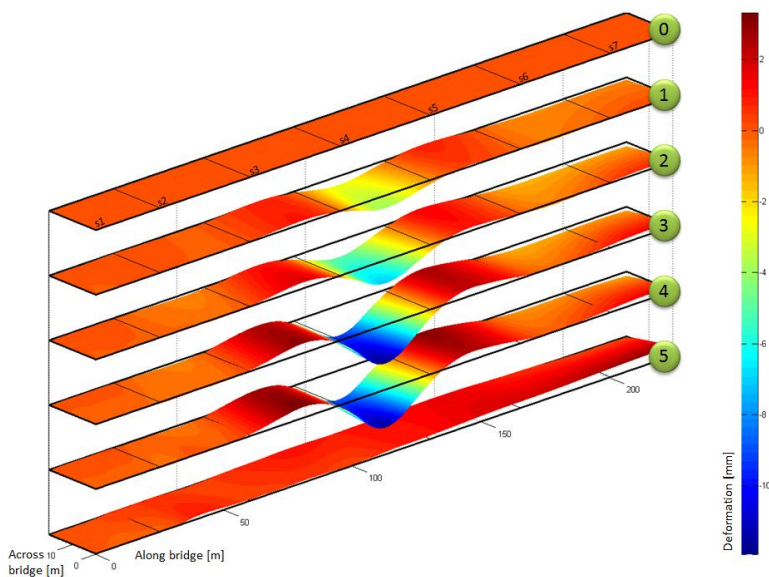
Fig 12 – Le deformazioni in millimetri raggiunte sul viadotto Sellero sulle 4 campate (s1 da 25 m, le altre da 35 metri) in funzione delle diverse fasi di carico: sulle campate s2 ed s4 sono stati caricati 800kN (fase 1), 1600kN (fase 2), 2400 kN (fase3 e dopo 8 minuti, fase 4). La fase 5 rappresenta le deformazioni residue rilevate. I bordi neri in figura rappresentano lo “zero” del sistema, il viadotto senza deformazioni. I dati e le deformazioni sono acquisite e mostrate in tempo reale.

Si riportano inoltre i risultati di una prova lungo il viadotto Berzo-Demo, di 225 metri di lunghezza, anch'esso in c.a. precompresso, utilizzando 20 elettrolivelli per lato ottenendo comunque risultati soddisfacenti.

Anche in questo caso si nota la deformata iniziale dovuta al carico fuori dall'asse del ponte.



Fig. 13 – Asymmetrical load testing



Sullo stesso viadotto è stata effettuata anche una prova per valutare il possibile ribaltamento della struttura, come mostrato dai risultati riportati nelle figure 14 e 15.

Nelle fasi 3 e 4 si nota a circa 70m dalle estremità opposte un lieve innalzamento del viadotto in particolar modo nelle posizioni delle pile.

Fig 14 – Le deformazioni in millimetri raggiunte sul viadotto Berzo Demo sulle 7campate (s1 e s7 da 25 m, le altre da 35 metri) in funzione delle diverse fasi di carico: sulla campata s4 sono stati caricati 1600kN (fase 1), 3200kN (fase 2), 4800 kN (fase3 e dopo 8 minuti, fase 4). La fase 5 rappresenta le deformazioni residue rilevate. I dati e le deformazioni sono acquisite e mostrate in tempo reale

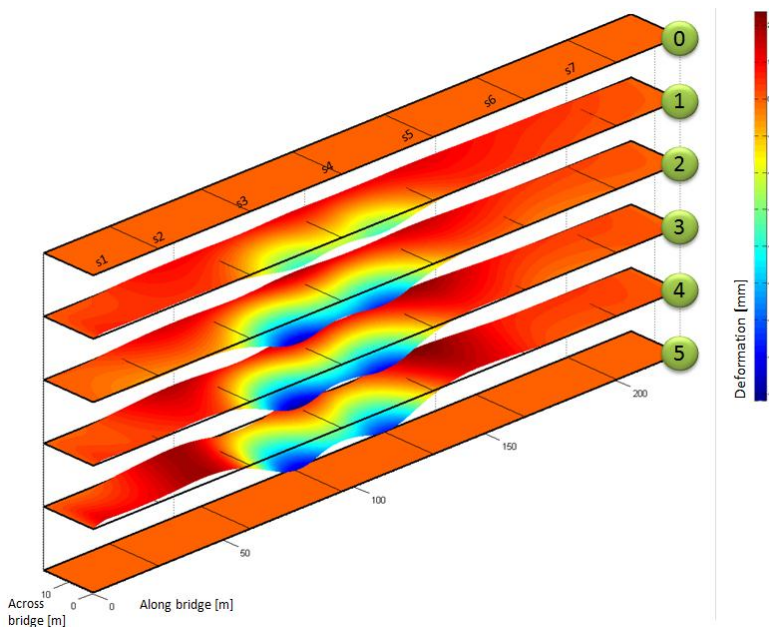


Fig 15 – Le deformazioni in millimetri raggiunte sul viadotto Berzo Demo sulle 7campate (s1 e s7 da 25 m, le altre da 35 metri) in funzione delle diverse fasi di carico: sulla campata s3 ed s4 sono stati caricati lungo un lato fino a 6400 kN (ottenuti con 16 camion, fase3). La fase 5 rappresenta le deformazioni residue rilevate. I dati e le deformazioni sono acquisite e mostrate in tempo reale. Si notano le deformazioni di innalzamento sul lato opposto e in particolar modo sulle pile, verificati anche mediante estensimetri posti al di sotto del viadotto

Una valida alternativa alle elettrolivelle è rappresentata da un altro sistema di misura sviluppato da Agisco e denominato *Profilometro*, anch'esso oggetto di brevetto internazionale.

Questo strumento è concepito per misurare i cedimenti di qualsiasi punto riferito a una postazione fissa o di cui sono noti i movimenti assoluti. Il sensore può essere impiegato sia a terra che in mare.

Il sistema si presenta come una lunga tubazione di diametro variabile da 50 a 100 mm con intervallati i contenitori con i punti di misura. La tubazione è molto robusta sia meccanicamente che elettricamente ed è sufficiente posarla a terra o sulla superficie interessata dalle misure, bloccando i contenitori dei trasduttori.

La misura della differenza di livello tra i vari punti di misura rende il sistema estremamente duttile e pertanto può essere configurato sul piano orizzontale con qualsiasi forma, come riportato nella figura seguente e assemblato fino a raggiungere lunghezze anche di qualche chilometro.

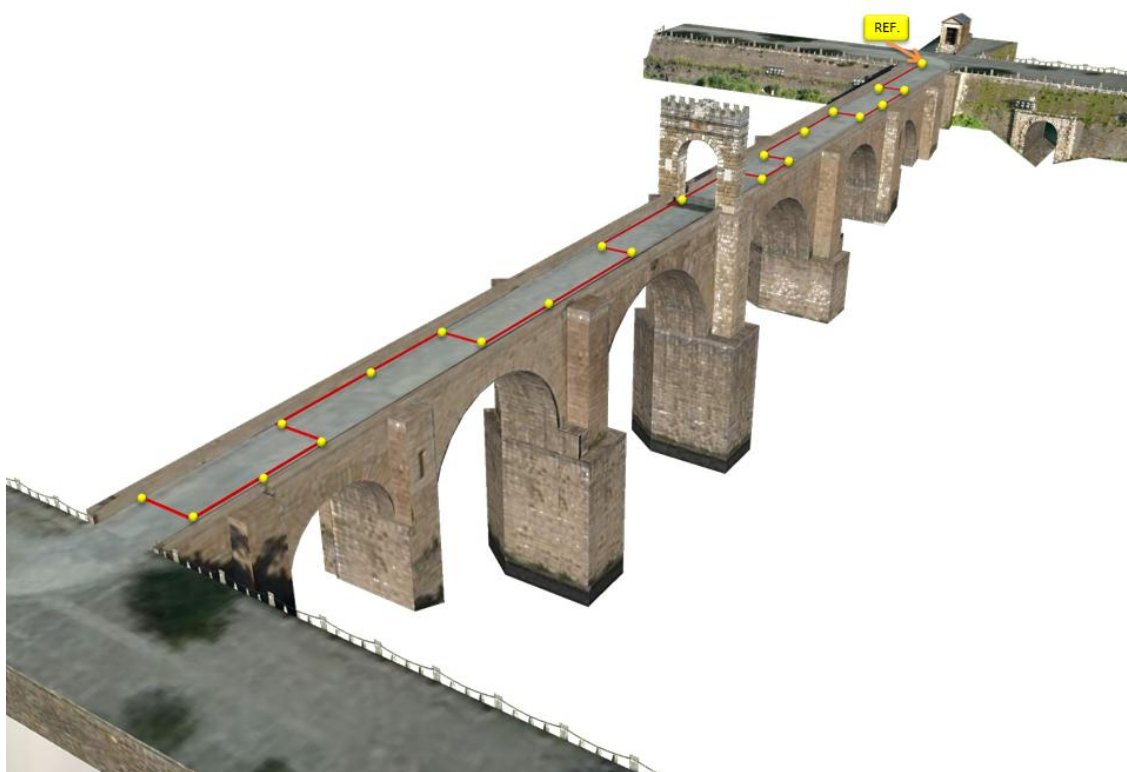


Fig. 16 – Riproduzione artistica in 3D di un profilometro sul ponte di Alcantara (Spagna)

Il principio di funzionamento si basa sulla misura della pressione di una colonna di liquido in un determinato numero di punti mediante speciali trasduttori. Al variare della posizione della colonna nello spazio la pressione misurata a ogni trasduttore varia e corrisponde al peso della parte di colonna sovrastante il trasduttore. Il sistema è compensato per le derive termiche sia a breve che a lungo periodo (decine di anni) ed è in grado di fornire le misure con una sensibilità superiore al decimo di millimetro.

La deformata completa avviene grazie all'impiego dello stesso applicativo software ECLIPSE che calcola il modello del sistema di sensori.

Le applicazioni di questo sistema sono molteplici: cedimenti di fondazioni, di strutture a terra o in mare, di fondali marini; profilatura di alvei di corsi d'acqua; collaudo di ponti; profilatura di gallerie.

Il vantaggio del profilometro rispetto alle elettrolivelle consiste nella misura differenziale dei cedimenti e la restituzione in tempo reale dei valori delle deformazioni così da rendere l'elaborazione dei dati più veloce e meno vulnerabile a possibili errori di calcolo.

Inoltre il profilometro ben si adatta a tutte quelle applicazioni dove siano presenti irregolarità o discontinuità del profilo della struttura difficilmente riscontrabili con le elettrolivelle.

Il sistema ben si adatta anche alla misura della deformata di ponti a mensola libera durante le fasi costruttive.

La misura della deformata, a partire dalle pile, viene completata aggiungendo alla catena i nuovi sensori via via che il ponte viene costruito, avendo così sempre monitorato il profilo dell'opera. Ciò rappresenta un aiuto aggiuntivo alle tecniche di posizionamento per mezzo di GPS incrementando così la precisione di misura sul piano verticale fino a qualche decimo di millimetro. Infatti, dati sulla posizione relativa e assoluta del ponte in costruzione sono disponibili in tempo reale al fine di facilitare le operazioni di unione delle due sezioni.



Fig. 17 – Riproduzione artistica di un profilometro sul fondo del Canal Grande



Fig. 18 – Ponte a mensola libera durante le fasi di incrocio sezioni