

Controllo di stabilità di una struttura ciclopedonale

Alberto Guarnieri¹, Nicola Milan¹, Antonio Vettore¹

¹ CIRGEO. – Centro Interdipartimentale di Ricerca di Geomatica - Università degli Studi di Padova, cirgeo@unipd.it

Sommario

In questa nota si presentano i risultati ottenuti nell'ambito del controllo di stabilità di una passerella ciclopedonale recentemente installata sul fiume Bacchiglione nella città di Padova. Le tradizionali misure di livellazione sono state integrate da misure GPS, accelerometriche e laser scanner terrestre (TLS), al fine di acquisire una più ampia tipologia di dati per eseguire la verifica di collaudo dell'opera. Vengono poste in evidenza le deformazioni subite dalla struttura e si confrontano i risultati ottenuti sulla base delle misure di livellazione, TLS, GPS e accelerometriche allo scopo di verificare la corrispondenza tra le deformazioni così calcolate e quelle teoriche stimate in sede di progettazione.

1. Introduzione

La richiesta di rilievi ad alta definizione nell'ambito di progetti relativi allo studio e monitoraggio del comportamento di strutture complesse sottoposte a fenomeni deformativi rappresenta uno dei principali fattori che ha favorito l'impiego della tecnologia laser a scansione. Come noto, misurando milioni di punti in un tempo relativamente breve, i laser scanner terrestri (TLS) consentono di ottenere modelli 3D completi e molto dettagliati di oggetti reali. Negli anni recenti, questa caratteristica ha spinto l'interesse di topografi, ingegneri, architetti e archeologi a considerare il laser a scansione come uno strumento di rilevamento fondamentale per la modellazione 3D di oggetti e strutture particolarmente complesse, che sempre più spesso compaiono nel completamento di opere infrastrutturali di un Paese. I corrispondenti modelli 3D sono stati utilizzati per differenti finalità, quali ad esempio: conservazione in appositi archivi informatici, interventi di restauro, studio dei materiali componenti, studio della funzione storica dell'oggetto o struttura rilevata, mostre in musei virtuali, studio di fenomeni deformativi. D'altra parte l'applicazione della tecnica laser scanning terrestre per il controllo di stabilità di una struttura appare a tutt'oggi un campo di ricerca poco indagato. Al fine di approfondire questa tematica, è stato attivato un progetto di ricerca che prevede di effettuare una serie di rilievi della nuova Passerella ciclopedonale "Rari Nantes" di Padova, ponte di categoria III, utilizzando una molteplicità di tecniche di rilevamento (laser scanner terrestre, total station, GPS e accelerometri). Nella nota vengono descritte le varie operazioni topografiche intraprese per il controllo di stabilità, evidenziando le deformazioni subite dalle varie parti della struttura in funzione delle prove di carico eseguite secondo le norme vigenti. In particolare si pongono in confronto tra loro le deformazioni calcolate sulla base delle misure di livellazione, di TLS e di GPS integrato con sensori accelerometrici. L'obiettivo è quello di verificare la corrispondenza tra le deformazioni così calcolate e quelle teoriche stimate in sede di progettazione.

2. La passerella ciclopedonale

Inaugurata nel Giugno 2009, questa struttura ricade in un'area a sud-ovest della città di Padova, in corrispondenza dello snodo viario del quartiere Bassanello, cerniera urbana di relazione dei vari quartieri ad esso affiancati e porta di ingresso alla città per il traffico proveniente da sud e sud-ovest. Poiché in questa zona giungevano senza trovare continuità molti percorsi ciclopedonali,

l'amministrazione comunale ha deciso a suo tempo di esguire un intervento di collegamento ciclopedonale attraverso il fiume Bacchiglione in uno dei luoghi strategicamente più opportuni allo sviluppo delle relazioni con i principali servizi dell'area, non ultimo l'intero complesso sportivo "Rari Nantes". Il progetto della passerella trae ispirazione dall'analisi e sintesi formale di uno degli "abitanti" più numerosi di quest'ambito fluviale, la gallinella d'acqua (*Gallinula chloropus*).

Realizzata secondo una struttura tubolare in acciaio, la passerella si caratterizza infatti dal punto di vista geometrico per la presenza di un arco asimmetrico inclinato di 22° rispetto alla verticale e coronato superiormente da una fascia a forma di becco d'uccello che funge da elemento di contro-bilanciamento (Fig. 1 e 2). L'impalcato presenta una larghezza complessiva variabile da 2,5 a 4 metri, oltre allo spazio destinato ai parapetti, e si sviluppa secondo un asse pressoché perpendicolare alla giacitura del fiume con una luce netta di 75 metri. Il piano di calpestio, in legno, è formato da un'orditura di travi principali e da un doppio tavolato dello spessore di cinque centimetri. Dal punto di vista statico il sistema portante è costituito da quattro meccanismi resistenti che si aiutano e stabilizzano vicendevolmente. Il primo meccanismo è caratterizzato da un arco a due cerniere costituito da profili tubolari di diametro 914 mm per la catena e 406 mm per l'arco con la funzione di sostenere verticalmente la passerella. Il secondo è formato da una reticolare di piano a livello impalcato, con la funzione di bloccare gli spostamenti orizzontali della catena dell'arco, mentre il terzo è costituito da una trave tipo Vierendel, avente come correnti l'arco stesso e un profilo scatolare di sezione triangolare disposto a una distanza variabile da 0 all'appoggio fino a circa 3 metri in chiave dell'arco, atta a contrastare gli spostamenti orizzontali e a stabilizzare l'arco stesso. Il quarto sistema serve infine ad incastrare le mensole che portano l'impalcato alla catena dell'arco. Questo incastro avviene sfruttando in parte la rigidità torsionale della catena e in parte la rigidità di un telaio a forma di L costituito dai pendini dell'arco uniti in modo rigido alle mensole dell'impalcato che contrasta la rotazione delle mensole mediante una coppia costituita da due forze orizzontali che caricano sul proprio piano la reticolare di impalcato e quella sulla sua superficie dell'arco. Al fine di ripartire uniformemente eventuali carichi concentrati, e quindi di limitare al massimo le deformazioni, si è prevista una trave reticolare tipo Vierendel che unisce le teste delle mensole dell'impalcato ai montanti del parapetto esterno. Le fondazioni sono infine costituite da elementi poggianti su micropali.



Figura 1: La passerella ciclopedonale "Rari Nantes". Figura 2: Vista laterale della struttura.

3. Acquisizione dati

Sono stati eseguiti tre rilievi della Passerella "Rari Nantes" mediante laser scanner Leica HDS 3000 e ricevitori GPS a doppia frequenza. I dati ottenuti dal TLS sono stati utilizzati sia per la modellazione 3D sia per il controllo di stabilità della passerella.

Nel corso dei rilievi effettuati finora sono state adottate differenti strategie di acquisizione. Durante la prima campagna di misura è stato eseguito il rilievo completo della passerella in modo da derivarne un modello 3D utilizzabile per condurre un'analisi strutturale agli Elementi Finiti. A tal fine l'intera struttura è stata rilevata adottando una risoluzione spaziale di 2 cm per gli elementi in

acciaio, mentre target bianchi e neri, non retroriflettenti, sono stati misurati con una risoluzione di 2 mm. L'impiego di mire artificiali si è reso necessario onde evitare possibili errori di selezione dei punti omologhi nel corso della registrazione delle scansioni, dato l'elevata complessità degli elementi costituenti la passerella. Complessivamente, nell'arco di due giorni, sono state acquisite 5 scansioni per un totale di circa 14.350.000 punti. La validazione del modello ad elementi finiti è avvenuta anche mediante rilievo GPS integrato con misure accelerometriche al fine di ottenere risultati di posizionamento più precisi e possibili mediante l'impiego di un filtro adattivo per soli 4 punti dell'impalcato. In questa prima fase del progetto la maggior parte del tempo è stata spesa per spostare il laser tra le varie stazioni di presa, operazione rallentata e resa difficile sia dalla presenza del cantiere, ancora in attività, sia dalla necessità di dover effettuare vari spostamenti tra una sponda e l'altra del fiume, muovendosi nel traffico urbano. Nei successivi rilievi, finalizzati al controllo di stabilità e condotti durante le fasi di collaudo della struttura, è stata rilevata solamente una porzione della struttura, quella ritenuta maggiormente sollecitata e oggetto di probabili deformazioni. In questa zona sono stati misurati 10 target retroriflettenti mediante stazione totale Leica TM30: le misure ottenute sono state successivamente impiegate per valutare, tramite confronto sugli stessi punti, la capacità del laser scanner di misurare eventuali spostamenti verticali della struttura.

3.1 Creazione del modello 3D

Le scansioni acquisite sono state registrate mediante software Cyclone adottando la classica procedura a due passi, consistente in una fase di pre-allineamento basata sulla selezione manuale dei target omologhi, seguita dalla fase di registrazione globale, basata sull'algoritmo ICP come descritto in (Besl, McKay, 1992; Chen, Medioni, 1992; Bergevin et al., 1996). Per quanto riguarda il pre-allineamento sono state utilizzate le scansioni laser renderizzate in scala di grigio sulla base del dato di intensità in modo da individuare più facilmente la posizione dei target all'interno delle nuvole di punti. Tale procedura ha consentito di ottenere un errore quadratico medio (RMSe) di allineamento globale pari a circa 9 mm. Un esempio del modello 3D completamente allineato è mostrato nelle figure 3 e 4, nelle quali i punti misurati sono stati renderizzati a falsi colori sulla base del dato di intensità registrato dallo strumento.

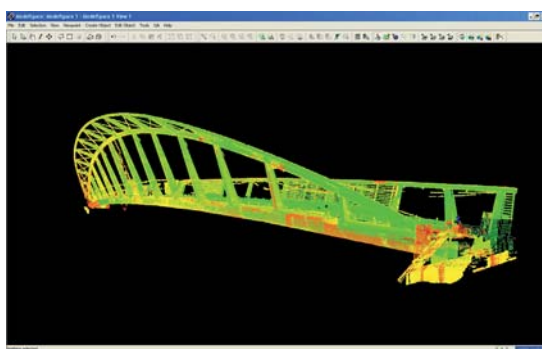


Figura 3: Vista laterale della passerella renderizzata a falsi colori.

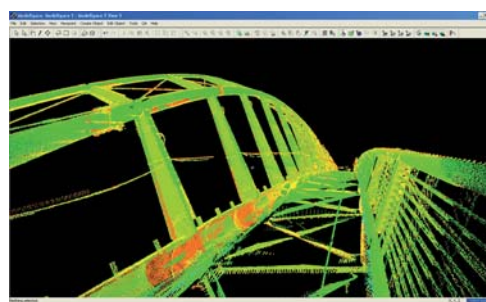


Figura 4: Primo piano a falsi colori della parte pedonale della passerella.

3.2 Semplificazione del modello laser

Successivamente alla registrazione, la nuvola di punti è stata sottoposta ad una procedura di semplificazione, necessaria per poter impiegare il modello 3D in Straus, programma di analisi agli Elementi Finiti. L'intera struttura è stata quindi sotto campionata con un passo di 5 cm. Questo valore è stato scelto confrontando tra loro i risultati ottenuti da ripetute procedure di decimazione

eseguite con passi differenti, valutando di volta in volta il rapporto tra livello di dettaglio e grado di semplificazione raggiunto. Il modello è stato quindi triangolato in Geomagic derivando una mesh di circa 1.197.501 triangoli, la quale è stata successivamente regionalizzata con Autocad ed infine importata in formato dxf in Straus (Fig. 5).

4. Analisi agli elementi finiti

Per poter applicare l'analisi FEM (*Finite Element Analysis*), il modello 3D laser triangolato ha subito un'ulteriore elaborazione in Straus. In particolare, alle superfici dei vari triangoli (*plates*) componenti la mesh sono state assegnate le medesime proprietà fisico-meccaniche, ovvero la mesh è stata assimilata ad un'unica struttura in acciaio, continua ed omogenea caratterizzata da uno spessore di 3 cm. La struttura è stata quindi considerata vincolata agli appoggi sulle sponde nord e sud del Fiume Bacchiglione, rimuovendo i gradi di libertà di tutti i nodi (vertici dei triangoli) posti alle estremità del modello (basamenti), come mostrato in figura 6 (punti in colore viola). Infine si è supposto che a ciascun *plate* costituente il basamento del passaggio carraio fosse applicata una forza di 400 kg/m^2 , agente lungo l'asse Z, in modo da simulare l'effetto di "folla compatta", applicata su tutta la parte sfavorevole della superficie di influenza.

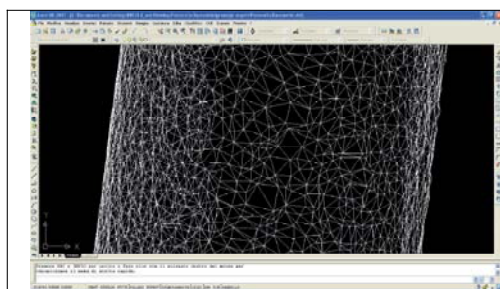


Figura 5: Regionalizzazione del modello 3D laser in AutoCAD.

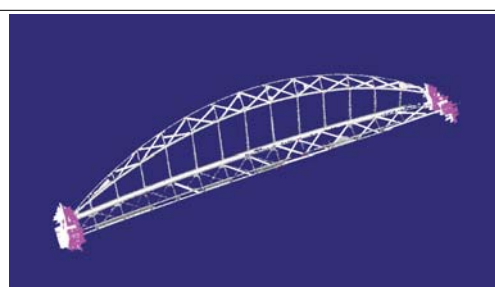


Figura 6: Assegnazione dei vincoli (punti in viola) alla struttura sul basamento.

In accordo con quanto stabilito dalla vigente legislazione italiana in materia di analisi strutturale, per un ponte di III categoria, sono state condotte due diverse tipologie di analisi:

1. Statica, dalla quale sono stati derivati grafici delle tensioni e dei momenti applicati ai vari *plates*, considerando l'azione dei seguenti fattori:
 - peso proprio della struttura;
 - peso della massa compatta di persone;
2. Dinamica, nella quale è stata considerata l'azione combinata dei seguenti tre fattori:
 - peso proprio della struttura;
 - peso della massa compatta di persone;
 - evento sismico attraverso la simulazione di un sisma applicato alla struttura in oggetto. A tal fine, benché la città di Padova appartenga alla zona di sismicità di livello 4 (bassa probabilità di terremoti) si è supposto che il modello della Passerella "Rari Nantes" fosse sottoposto agli effetti di un sisma tipico di zone a livello 3.

I risultati ottenuti dall'analisi statica sono mostrati nelle figure 7 e 8, mentre per quanto riguarda l'analisi dinamica i risultati vengono esportati da Straus sottoforma di video, non riportati in questa nota.

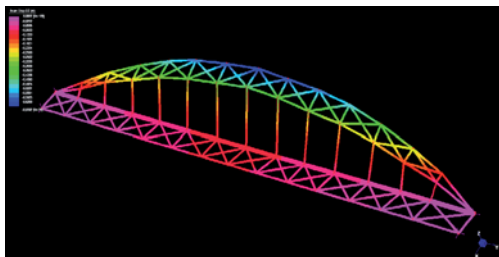


Figura 7: Risultato dell'analisi statica lineare.
Vista degli spostamenti globali.

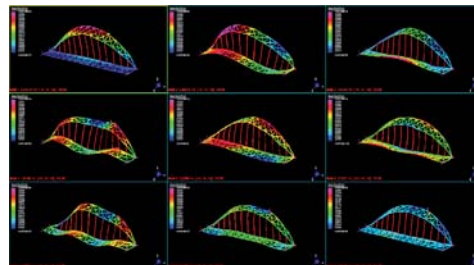


Figura 8: Risultato dell'analisi statica lineare.
Modi propri di vibrare della struttura.

4. Controllo di stabilità

Le vibrazioni nei ponti pedonali possono essere prodotte da varie cause quali, ad esempio, vento, persone singole o in gruppo che camminano, corrono, saltano o danzano sul ponte. Ai fini delle verifiche dello stato limite di vibrazione può essere necessario considerare appropriati modelli dinamici che tengano conto sia del numero e delle posizioni delle persone simultaneamente presenti sul ponte sia di fattori estremi, quale la localizzazione del ponte stesso, e definire opportuni criteri di confronto, facendo riferimento a normative e a procedure di calcolo.

A titolo puramente informativo, si può considerare che in assenza di significative risposte da parte del ponte, una persona che cammina esercita su di esso un'azione periodica verticale con frequenza compresa tra 1 e 3 Hz e un'azione orizzontale simultanea con frequenza compresa tra 0,5 e 1,5 Hz ; un gruppo di persone in leggera corsa esercita sul ponte una frequenza verticale pari a circa 3Hz.

Durante la prova di carico la passerella è stata caricata, procedendo da sinistra verso destra, con lo schema di "folla compatta", per un carico complessivo di 90t; ad ogni step si è misurato con stazione motorizzata Leica TM30 l'abbassamento dei punti più significativi e del punto di mezzeria. Il punto in mezzeria si è abbassato complessivamente di 14,20 cm rispetto all'abbassamento teorico (previsto nella analisi FEM di 19 cm), dando dimostrazione delle ottime capacità prestazionali del manufatto. Dopo aver scaricato completamente l'intera passerella è stata fatta un'ulteriore misurazione per valutare l'abbassamento residuo. In mezzeria tale abbassamento si è attestato sull'ordine di circa 2 cm.

Carico (t)	Spostamento (cm)
15,00	2,70
30,00	5,80
60,00	10,50
90,00	14,20

Tabella 1: Relazione tra abbassamenti in mezzeria e carico complessivo

Conclusioni

In questa nota sono stati presentati alcuni dei risultati finora ottenuti nell'ambito di un progetto di ricerca finalizzato all'impiego integrato di diverse tecniche di rilevamento applicate alla Passerella ciclopedonale "Rari Nantes" di Padova. Un primo modello 3D è stato appositamente prodotto per condurre un'analisi agli elementi finiti, di tipo statico e dinamico. La validazione del modello FEM è avvenuta mediante GPS, accelerometri e filtro adattivo. Successivamente è stato eseguito un controllo di stabilità su una porzione della passerella, quella ritenuta maggiormente sollecitata e oggetto di probabili deformazioni. In questa seconda analisi l

Si ringraziano in particolare il Progettista Arch. Lorenzo Attolico dello studio Progeest di Padova per i dati di progettazione forniti e Leica Italia per il supporto strumentale.

Bibliografia

- Besl P. J., McKay N. D. (1992). "A method for registration of 3-D shapes". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 4(2): 239–256.
- Bergevin R., Soucy M., Gagnon H. and Laurendeau D. (1996). "Towards a general multi-view registration technique". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 18(5):540–547.
- Chen Y., Medioni G. (1992). "Object modelling by registration of multiple range images". *Image and Vision Computing*, 10(3):145–155.
- "Galileo" n. 190, Rivista del Collegio degli Ingegneri della Provincia di Padova.
- Guarnieri A., Remondino F., Vettore A. (2006). "Digital photogrammetry and TLS data fusion applied to Cultural Heritage 3D modeling". In *Proc. of ISPRS Comm. V Symposium "Image Engineering and Vision Metrology"*, Dresden, Germany.
- Leica Geosystems. The HDS 3000 technical specifications. URL: <http://www.leicageosystems.com>.
- Raindrop Geomagic, <http://www.raindrop.com>.
- STRAUS, <http://www.hsh.info>.
- Valanis A., Tsakiri M., 2004. "Automatic target identification for laser scanners". *Proc. of XXth ISPRS Congress*, Istanbul, Turchia.