fig. 1

Una passerella pedonale nel ricordo di due secoli di storia dei grandi ponti sospesi

La progettazione architettonica e strutturale dei ponti rappresenta sicuramente una delle sfide più stimolanti affrontabili nel campo dell'ingegneria, sia per l'alto valore simbolico da sempre posseduto da queste opere, antiche quanto l'uomo, sia perchè la loro costruzione di fatto è continuo laboratorio di verifica e sperimentazione di nuove tecnologie, materiali e conoscenze scientifiche. Nella presente memoria si da conto di una recente progettazione effettuata per conto della Comunità Montana del Gemonese, Canal del Ferro e Val Canale, relativa ad una passerella pedonale sospesa in legno ed acciaio sul torrente Venzonassa, a Venzone, fornendo nel contempo alcune notizie ed indicazioni generali relative alla storia e alla evoluzione progettuale dei ponti sospesi.

Alessandro Coccolo

Tra le più spettacolari realizzazioni dell'Ingegneria Strutturale del diciannovesimo e ventesimo secolo un posto di primo piano indiscutibilmente spetta ai grandi ponti sospesi. La storia di tali tipologie di attraversamento viene oramai univocamente fatta iniziare nel 1826, data dell'apertura al traffico del ponte sullo stretto di Menai (Galles, L=176 m) realizzato dall'ingegnere inglese Thomas Telford. La struttura, composta da un sistema di catene metalliche connesse a cerniera e sospendenti un impalcato in legno leggero e deformabile, purtroppo crollò in seguito ad una tempesta di vento poco dopo l'inaugurazione. Altra opera fondamentale del diciannovesimo secolo fu senz'altro il ponte di Brooklyn (New York, 487 m), realizzato nel 1883 per congiungere Manhattan e Long Island, ma si deve tuttavia attendere il ventesimo secolo per vedere superata l'impressionante luce di 1.000 m monocampata, con tre importanti realizzazioni: il Washington bridge (New York, 1.067 m), realizzato nel 1931, il Golden Gate bridge (San Francisco, 1.280 m), risalente al 1937 e il Verrazzano bridge (New York, 1.298 m), costruito dalla società Amman & Whitney ed inaugurato nel 1964. Deve sicuramente far riflettere come la luce di 1.300 m sia rimasta per quasi un ventennio un limite insuperato, a riprova di un progressivo "attingimento e prosciugamento" dell'intero patrimonio scientifico (metodi di calcolo) e tecnologico (materiali e logistica di cantiere) disponibile nella seconda metà del ventesimo secolo per la costruzione di questi capolavori d'ingegneria. Si deve infatti attendere il 1981 per vedere realizzato, su progetto di Gilbert Roberts e Bill Harvey l'Humber bridge (Gran Bretagna 1.410 m) e soprattutto il 1998, data storica per i ponti sospesi, per assistere all'apertura al traffico dei due più grandi ponti sospesi tuttora esistenti il Great Belt link tra le isole Funer e Zealand (Danimarca, 1.624 m) e i ponte Akashi Kaiko sullo stretto d Akashi (Giappone, 1.991 m), a tutt'oggi il più lungo ponte sospeso de mondo. Come sottolinea saggiamente il prof. Mazzolani in una sua recente memoria (Mazzolani, 2004), nella

dott. ing. Alessandro Coccolo, libero professionista
CP Ingegneria - Gemona del Friuli (Udine)

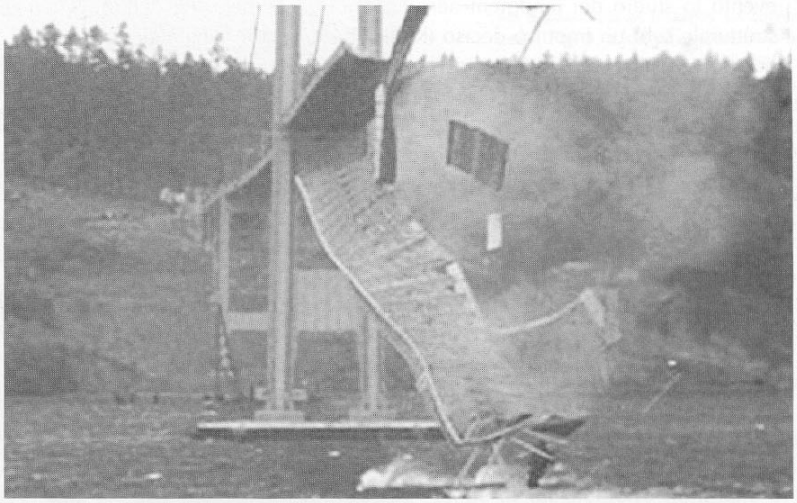
storia dei ponti sospesi l'incremento di luce è sempre stato ottenuto a piccoli passi, mai con salti dimensionali imprudenti ed ingiustificabili: "Dal superamento della luce limite di 1.000 m con una sola campata (1931) sono passati circa 70 anni, nel corso dei quali l'aumento di luce è stato di circa 900 m, con un incremento di quasi 13 m all'anno". Al solo fine di offrire al lettore uno spunto di riflessione si deve ricordare che l'ipotizzato ponte di Messina, del quale a tutt'oggi non esiste ufficialmente una analisi strutturale esecutiva relativamente alla soluzione progettuale ipotizzata e alla effettiva cantierabilità dell'opera, presenta una luce di 3.300 m.

Tralasciando definitivamente la scala "planetaria" delle realizzazioni, sia dal punto di vista della localizzazione geografica che da quello della luce superata, va certamente ricordato che anche nel territorio montano friulano si procedette, nei decenni passati, alla costruzione di diversi attraversamenti sospesi, perlopiù con finalità silvo-pastorali o di collegamento delle frazioni isolate con il fondovalle. Si trattò di realizzazioni con luce mai superiore a 30-50 m e con esclusivo utilizzo pedonale (3ª categoria). Si ricordano a tal proposito il ponte di Dogna alla foce del torrente omonimo, la oramai distrutta passerella di Cadramazzo sul fiume Fella, tra Chiusaforte e Dogna, il recentemente ristrutturato ponte di Tigo sul torrente Resia, con doppia campata e una pila in alveo, il ponte di Povici sul rio Serai alla confluenza con il torrente Resia, e la recente ed elegante passerella di Trasaghis sul torrente Leale (fig. 2).

Il ponte sul Tagliamento distrutto dall'alluvione del 1966

In ambito locale anche nel territorio comunale di Venzone venne, in passato, realizzata una passerella pedonale sospesa (fig. 3), finalizzata al collegamento del capoluogo con la frazione di Pioverno, posta in sponda destra del Tagliamento, in sostituzione del locale passo di barca (Avon et al., 2004; Bressan, 2002).

Il progetto dell'opera fu concepito nel 1921 e via via sviluppato fino alla versione definitiva del 1924, la quale prevedeva un attraversamento costituito due pile centrali in alveo, piano viabile in legno di castagno con larghezza di transito di 1,50 m appe-



L' ANALISI STRUTTURALE DEI PONTI SOSPESI

Lo studio della flessione verticale dei ponti sospesi è generalmente conducibile attraverso un modello strutturale piano bidimensionale, costituito da cavo di sospensione, trave d'impalcato e pendini verticali di sospensione. Il primo inquadramento teorico di tale modello si deve a Rankine, il quale teorizzò il comportamento di una trave semplicemente appoggiata agli estremi sospesa ad un cavo con estremità fisse.

Le ipotesi alla base del modello erano piuttosto restrittive, e di fatto accettabili solo in presenza di impalcato infinitamente rigido posto su appoggi molto deformabili, con condizione di carico simmetrica. Gli anni che seguirono proposero sviluppi sostanziali alla teoria di base, al fine di affrontare il problema della congruenza tra spostamenti dei cavi di sospensione, governati dalla rigidezza estensionale degli stessi, e dell'impalcato, governati dalla sua rigidezza flessionale. Con particolare riguardo all'elemento cavo va infatti osservato che esso presenta un comportamento meccanico non lineare, mostrando un progressivo irrigidimento al crescere del carico sollecitante e una effettiva rigidezza estensionale dipendente dalla catenaria iniziale dovuta al peso proprio.

Il problema della flessione verticale giunse ad una formulazione definitiva in seguito al contributo di Melan (Melan, 1906), il quale pervenne alla scrittura della equazione fondamentale integro-differenziale non lineare della statica dei ponti sospesi. Il Washington bridge e il Golden Gate bridge furono le prime grandi realizzazioni sorte nel contesto di tale teoria.

Il lavoro di Melan fu successivamente perfezionato da Moisseif (Moisseif e Lienhard, 1932), con la generalizzazione della teoria al caso di sollecitazioni in posizione generica sull'impalcato, e da Bleich (Bleich, 1935) con la linearizzazione della teoria stessa al caso di ponti di grande luce, condizione in cui i carichi variabili tendono a divenire piccoli se confrontati al peso permanente del ponte. Entrambi questi sviluppi consentirono di estendere il problema anche al caso in cui il carico addizionale presenti una eccentricità nella sezione trasversale dell'impalcato, tale da indurre nella sezione stessa un effetto torcente.

Il fatto che la teoria di Melan e i successivi affinamenti non richiedessero un minimo definito di rigidezza flessionale dell'impalcato, attribuendo integralmente alla deformabilità dei cavi l'assorbimento dei carichi portati, ritardò notevolmente l'analisi di quello che rappresenta probabilmente il problema principale degli attraversamenti sospesi, cioè la risposta strutturale del sistema nei confronti dell'azione del vento.

La sottovalutazione del fenomeno emerse in tutta la sua drammaticità il 7 novembre 1940 quando il Tacoma Narrows bridge (stato di Washington, 855 m), progettato da Moisseiff, crollò dopo una serie di vibrazioni autoeccitate, torsionali e antisimmetriche (flutter), durate circa un paio d'ore e indotte da un vento con velocità media di circa 50-70 km/h (fig. in alto). Da quel tragico

evento lo studio dei fenomeni aerodinamici ed aeroelastici nell'ingegneria strutturale subì un impulso deciso (Krall, 1945), con il raggiungimento odierno di livelli di approfondimento e complessità impensabili per quegli anni, anche grazie all'ausilio dell'elaboratore elettronico e all'analisi multimodale (D'Asdia e Sepe, 2001).

Ciò ebbe ricaduta diretta sulla concezione strutturale degli impalcati dei ponti sospesi, sia in relazione al necessario rinforzo delle opere già realizzate (Golden Gate bridge, Washington bridge), sia più in generale sulla necessità di garantire alle future costruzioni adeguata rigidezza flessionale e torsionale d'impalcato.

La prima soluzione strutturale utilizzata fu sicuramente il sistema a travatura reticolare (Verrazzano bridge), ad elevato peso proprio e inflessione laterale, di cui l'Akashi Kaiko bridge rappresenta probabilmente il limite superiore in termini di luce realizzabile. Successivamente gli studi si indirizzarono verso la sezione a cassone singolo scatolare, utilizzata per esempio nell'Humber bridge, dotata di elevata resistenza al vento e rigidezza torsionale, minore peso proprio ma maggiore predisposizione all'instabilità sezionale.

Una ulteriore evoluzione di quest'ultima soluzione appartiene ai giorni nostri, e consiste nella rigida connessione di cassoni multipli sagomati aerodinamicamente a profilo alare, al fine di ottenere una sezione strutturale caratterizzata da modesta resistenza al vento, basso peso proprio e intrinseca stabilità nei confronti dei fenomeni aeroelastici. Tale concezione è alla base degli studi preliminari relativi al ponte di Messina. Non risultano a tutt'oggi ancora realizzati ponti basati su tale schema strutturale che, come evidente, mira a minimizzare "all'origine" i fenomeni pericolosi piuttosto che "opporre" resistenza strutturale una volta che questi si sono innescati.

Le argomentazioni sopra accennate, inevitabilmente "banalizzate" nel tentativo improbabile di riassumerle, stanno alla base della concezione dei grandi ponti sospesi di oggi. Per essi è d'obbligo spingere l'approfondimento dell'analisi strutturale ai livelli estremi sfruttando tutte le specifiche conoscenze disponibili, sia a causa del rischio di perdita di vite umane connesso alla vita utile delle opere (il traffico stimato sul Golden Gate bridge è di 40.000.000 di veicoli all'anno!), sia per l'entità dei finanziamenti economici che devono inevitabilmente essere impegnati per la progettazione, la cantierizzazione, e, non ultimo, l'esercizio di queste grandi opere di ingegneria. Viceversa la costruzione di opere di modesta dimensione e traffico, quali le passerelle pedonali sospese, pur dovendo ovviamente ottemperare alla normativa tecnica vigente, permette una analisi strutturale più speditiva e schematizzata, in special modo per quanto attiene allo studio della instabilità aeroelastica, conducibile in tal caso con modelli semplificati (Irvine, 1981). Per questi ultimi tipi di attraversamento deve tuttavia essere controllato con una certa attenzione un ulteriore e subdolo fenomeno parassita, consistente nelle vibrazioni eccitate dal passo umano (Allen e Murray, 1993; Fujino et al., 1993). Tale problema può infatti risultare talmente fastidioso per il traffico pedonale da rendere inutilizzabile la struttura e richiederne l'adeguamento funzionale per mezzo di idonei dispositivi di smorzamento. Il caso del Millennium bridge di Londra è, a questo proposito, emblematico (Dallard et al., 2001).

Infine, per quanto riguarda la normativa tecnica vigente va osservato che, a scala regionale, il Dpr 335/2004, nel suo allegato A, classifica la stragrande maggioranza degli attraversamenti tra le opere strategiche, vincolando conseguentemente il progetto strutturale all'ottemperanza della vigente Opcm 3274 e succ. mod. e int.. In buona sostanza, visto l'impianto teorico di quella norma, è oramai inevitabile dover affrontare il calcolo dei ponti secondo un approccio semiprobabilistico agli stati limite, attingendo dal Dm 4.05.1990 e dal prossimo Testo Unico per quanto attiene a schemi e combinazioni di carico, dall'Opcm 3274 per la definizione della combinazione sismica, e più in generale dal sistema degli Eurocodici per specifiche problematiche progettuali. Con riferimento a questi ultimi documenti, nel caso delle passerelle pedonali sospese risultano essere utili sia EC1-2-4 (Azioni sulle strutture - azioni del vento), dove all'appendice C si analizzano gli effetti aeroelastici dovuti al vento, sia EC5-2 (ponti in legno), in special modo al capitolo 7 relativo ai fenomeni vibratori in esercizio.

so a gomene metalliche, torrette in muratura con portali ad arco acuto al di sopra di pile e spalle. L'opera fu completata nel 1926 e successivamente ripristinata nel 1948, in seguito ai danni causati dal conflitto mondiale. In tale sede si procedette al ricondizionamento dell'impalcato, sostituendo l'assito in legname con più rigide e pesanti piastre in calcestruzzo.

La parola fine al ponte sospeso per Pioverno fu tragicamente scritta il 4 novembre 1966 (fig. 3), quando la catastrofica e a tutt'oggi insuperata piena del Tagliamento distrusse completamente l'importante opera rendendone inevitabile la successiva ricostruzione (1970) e allargamento (1991) in una ottica oramai stradale e non più esclusivamente pedonale.

Il progetto e la costruzione della passerella sulla Venzonassa

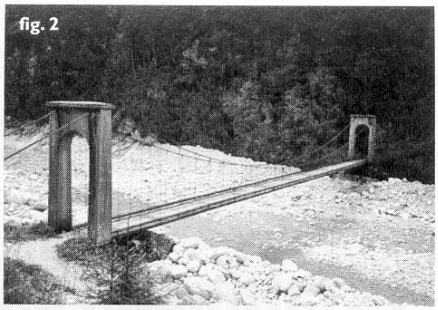
Il ponte sospeso di San Giorgio sul torrente Venzonassa viene ideato nel 2001 su iniziativa della Comunità Montana del Gemonese, Canal del Ferro e Val Canale, e cofinanziamento dell'Amministrazione Comunale di Venzone, nell'ambito di una serie di interventi finalizzati a creare itinerari attrezzati per la fruizione turistica del comprensorio del Gemonese. L'opera viene infatti collegata funzionalmente agli interventi predisposti nell'ambito della valorizzazione turistica della Val Venzonassa, per i quali viene presentata una specifica richiesta di finanziamento europeo ai sensi delle sottomisure S2 ed S1 del Piano di Sviluppo Rurale 2000-2006. Essa è caratterizzata da una lunghezza di circa 40 m e una larghezza utile di 2,0 m, e, attraversando il torrente circa 300 m a monte dell'esistente "Ponte della Dogana", consente il diretto collegamento ciclo-pedonale tra la borgata di Sottomonte e la viabilità degli impianti sportivi comunali (fig. 1, sopra il titolo). La progettazione della struttura viene condotta in varie fasi nel triennio 2001-2004, determinando un costo di costruzione complessivo di 228.000 Euro corrispondente ad un costo unitario per mq di impalcato di circa 2.500 Euro/mq. La cantierizzazione avviene dal settembre 2004 al maggio 2005, mentre la definitiva apertura al traffico pedonale si realizza ufficialmente il 14 agosto 2005.

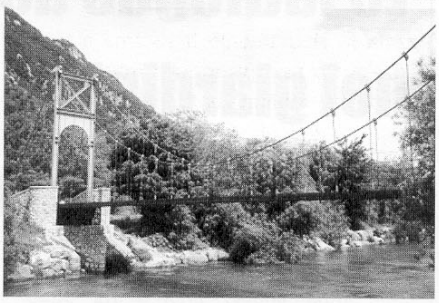
La concezione strutturale dell'opera persegue linee pulite ed essenziali,

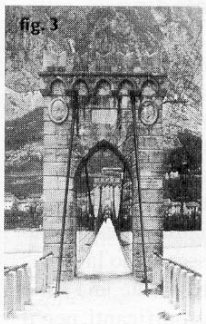
richiamando nei portali di testa un elemento architettonico, l'arco a sesto acuto, già utilizzato nelle torrette della vecchia passerella di Pioverno, e facendo uso predominante di materiali quali il legno, qui trattato con finitura a cera idrorepellente al fine di incrementarne la durabilità, e l'acciaio. Ove si è reso necessario l'utilizzo di calcestruzzo armato fuori terra (rampe di accesso, plinti), questo è stato integralmente rivestito con pietrame locale cementato.

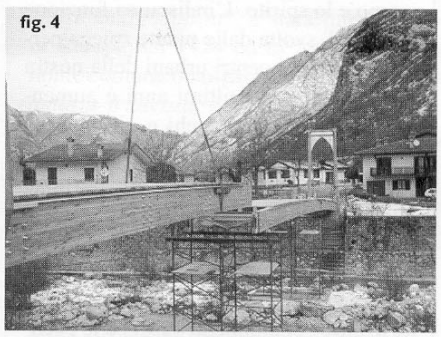
L'impalcato, poggiante alle estremità su idonei plinti in calcestruzzo armato e appeso alle gomene portanti mediante 12+12 pendini di sospensione in fune spiroidale, è stato realizzato assemblando due travi principali laterali in legno lamellare di larice a debole curvatura, di sezione 20x64 cm, a cui sono stati vincolati traversi in larice lamellare di sezione 14x28 cm posti ad interasse di 3,00 m. I traversi sostengono una orditura superiore in correnti anch'essi in larice lamellare, di sezione 12x16 cm, disposti parallelamente alle travi principali ad interasse di 52 cm, e il superiore tavolato di usura, in larice massiccio con spessore di 4 cm. L'impalcato è stato irrigidito nel proprio piano mediante un sistema reticolare con tondi diagonali in acciaio aventi diametro 20 mm connessi ai traversi, ed inoltre, al fine di perseguire il fondamentale irrigidimento torsionale nel piano trasversale, mediante telai reticolari in profili d'acciaio L70x70x6 mm posti a collegare le travi principali e sfalsati di ½ passo rispetto ai traversi. Ragioni costruttive legate al varo con utilizzo di autogru semovente di grande portata hanno consigliato di suddividere l'impalcato in tre parti distinte (14+12+14 m), integralmente prefabbricate fuori opera e assemblate in sito mediante piastre a scomparsa in acciaio fissate nelle travi principali, a ripristinare la continuità strutturale (fig. 4). A tale proposito il persistente stato di magra del corso d'acqua durante l'intera durata dei lavori ha consentito il parziale inalveamento dei deflussi in prossimità agli argini, e la conseguente messa in opera di una coppia di ponteggi di servizio in centro alveo a sostegno temporaneo degli elementi prefabbricati, fino alla messa in carico delle funi portanti.

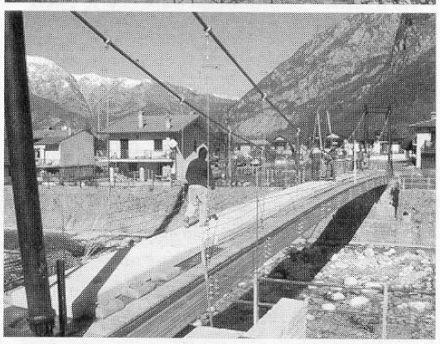
Il sistema di sospensione dell'impalcato è stato realizzato mediante 2 gomene portanti in acciaio ad alta resistenza a finitura esterna chiusa (carico di rottura 4.420 kN), prestirate in stabilimento al fine di annullare la deformazione anelastica iniziale. Allo











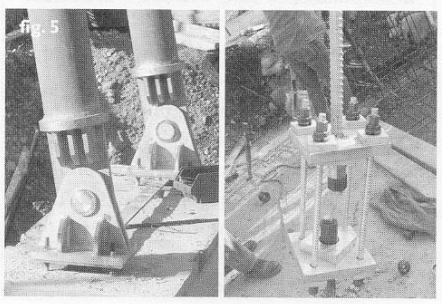


Fig. 2, in alto: la passerella pedonale di Povici sul rio Serai (Resiutta); **in basso**, la passerella di Trasaghis sul torrente Leale. **Fig. 3, a sinistra**, torretta in muratura dell'antica passerella di Pioverno sul Tagliamento (Venzone); **a destra**, il crollo del ponte durante la piena del 4 novembre 1966. **Fig. 4**, fasi costruttive della nuova passerella: **in alto**, il varo dell'impalcato; **in basso**, il collaudo con piastre di cemento. **Fig. 5**, particolari costruttivi della nuova passerella: **a sinistra**, cerniera di base; **a destra**, collegamento strallo-tirante.

scopo di limitare la freccia sottocarico dell'impalcato a valori compatibili con quelli ammissibili per il legno lamellare, si è resa necessaria l'adozione di un diametro nominale delle gomene pari a 66 mm. Tale sezione ha permesso di limitare la freccia massima a pieno carico del ponte a circa 13 cm, valore previsto in sede di analisi strutturale e effettivamente rilevato in sede di collaudo statico (fig. 4). Alle funi portanti sono stati collegati, ad interasse di 3,0 m, i pendini di sospensione in corderia spiroidale di diametro pari a 12 mm (carico di rottura 120 kN). La connessione pendino-impalcato è stata realizzata per contrasto sul lembo inferiore delle travi principali, mediante capicorda cilindrici passanti attraverso le stesse e piastre circolari di ripartizione del carico. L'attacco delle gomene principali ai portali di testa, costituiti da colonne tubolari Fe510-244,5x20 mm solidarizzate a traversi irrigidenti sommitali, ha invece richiesto l'utilizzo di capicorda a forcella, collegati ai fazzoletti sommitali delle colonne mediante perni passanti. I portali di testa sono stati vincolati ai medesimi plinti su cui appoggiano le estremità dell'impalcato mediante cerniere perno di base (fig. 5), dimensionate su di un valore di compressione in esercizio (pieno carico del ponte) pari a 690 kN.

La trasmissione a terra degli sforzi trasmessi dalle gomene portanti è stata realizzata mediante stralli in barra Gewi Bst500-550 del diametro di 50 mm, controtubati, soggetti ognuno ad un carico di trazione in esercizio (pieno carico del ponte) pari a 630 kN, vincolati per contrasto al nodo sommitale dei portali di testa e ai tiranti di ancoraggio in fondazione. Questi ultimi sono stati concepiti nel medesimo materiale e diametro degli stralli, mettendo in opera pali Gewi preiniettati in stabilimento e muniti di doppia protezione anticorrosiva. Il collegamento strallo-tirante è stato realizzato mediante unione a forza

monodimensionale formata da doppia piastra di contrasto e n. 4 spinotti in acciaio Gewi del diametro di 28 mm (fig. 5). L'utilizzo di dadi conici e piastre svasate ha permesso di ovviare agli inevitabili errori di centramento e alle eccentricità accidentali occorse in fase di montaggio, semplificando notevolmente l'assemblaggio del collegamento. Relativamente ai tiranti va osservato che, in casi come questo in cui, per varie ragioni, si preveda di installare un solo elemento per strallo, prima di procedere alle successive fasi di costruzione deve ritenersi indispensabile effettuare una prova di carico di ognuno di essi. Per quanto riguarda infine ai plinti sostenenti impalcato e portali di testa, questi, trovandosi in immediata vicinanza ai muri d'argine, sono stati fondati su cavalletti di micropali valvolati, di sezione tubolare Fe510-88,9x9 mm, localizzati in asse alle colonne dei portali. Ciò al fine di trasferire le azioni di progetto agli strati più profondi del terreno alluvionale, evitando di gravare direttamente sulle difese fluviali preesistenti in pietrame cementato.

A.C.

Bibliografia

ALLEN D. E., MURRAY T. M. (1993): *Design criterion for vibrations due to walking*. AISC Engineering Journal, Fourth Quarter (1993), 117-129.

AVON ET AL. (2004): *I passaggi del Tagliamento. Storia e leggenda di guadi, traghetti e ponti attraverso i secoli e il turbine di due guerre mondiali*. Ed. La Bassa, Latisana 252 pp.

BLEICH H. (1935): *Die berechnung verankerter Hängebrücken*. Springer,Vienna, 1935.

BRESSAN D. (2002): *Pluvèr. Un païs fra l'âghe e la mont. Pro Loco Venzone e Pioverno*, 79 pp.

DALLARD P. et al. (2001): *The London Millennium Footbridge. The Structural Engineer*, vol. 79, n°22, 17-33.

D'ASDIA P., SEPE V. (2001): *Fenomeni aeroelastici nei ponti di grande luce. In: Ingegneria del Vento - Introduzione alla progettazione strutturale alla luce della nuova normativa*, CISM, 2001, 201-218.

FUJINO Y. et al. (1993): *Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congested pedestrian bridge. Earthquake Engineering and Structural Mechanics*, 22 (1993), 741-758.

KRALL G. (1945): *Instabilità aerodinamica nei ponti sospesi. Monografie Scientifiche di Aeronautica, Associazione Culturale Aeronautica*, n°2, ottobre 1945, 27 pp.

IRVINE H. M. (1981): *Cable Structures. MIT Press, Boston*, 1981, 256 pp.

MAZZOLANI F. M. (2004): *Alcune considerazioni su quello che sarà il ponte sospeso più lungo del mondo per l'attraversamento dello stretto di Messina. Costruzioni Metalliche*, 1, 2004, 47-50.

MELAN J. (1906): *Theorie der eisernen Bogenbrücken und der Hängebrücken. Handbuch der Ingenieurwissenshaften*, Leipzig, 1906.

MOISSEIF L.S., LIENHARD F. (1932): *Suspension bridges under the action of lateral forces. Proceedings American Society Civil Engineers*, 1932.