

Analisi dinamica del sistema di illuminamento, attraverso i "giunchi luminosi"

L'impianto del parco della memoria di San Giuliano di Puglia (Campobasso)

di Giuseppe Rossi*, Felisiano Propato*

Lo studio in esame riguarda la valutazione dell'impatto degli organi illuminanti, "giunchi luminosi" previsti nell'ambito della realizzazione del Parco della Memoria a S. Giuliano di Puglia (Campobasso). Il sistema, indicato nella figura 1, è costituito da paline sulla cui sommità è alloggiata una lampada denominata ogiva.

Modello strutturale

Giunco luminoso

Il singolo elemento, "giunco", si compone di un'asta in poliestere rinforzato con fibra di vetro (VTR), avente sezione tubolare cava di diametro $D=12,5$ mm e spessore $s=1,25$ mm, con altezze variabili.

Le proprietà elastiche sono state determinate mediante prove di carico eseguite su una mensola orizzontale di luce 2.500 mm: per effetto del solo peso proprio, all'estremo libero si è misurata una freccia di circa 150 mm, applicandovi un carico concentrato di 5 N la freccia è diventata di circa 930 mm. Sono state eseguite analisi FEM con il software STRAU7 R2.4.4, modellando il giunco mediante elementi beam con formulazione alla Eulero-Bernoulli. Il materiale è

elasto-fragile, si ammette quindi valida l'ipotesi delle piccole deformazioni, le analisi si svolgono in regime di grandi spostamenti (attivazione della non linearità geometrica con inclusione della matrice K_G); in figura 2 sono riportati i parametri elastici ottenuti dal confronto delle analisi FEM con i risultati sperimentali. Per determinare le proprietà inelastiche sono state eseguite ulteriori prove di carico su una mensola accorciata a 420 mm: applicando un carico fino a 150 N a circa 10 mm dall'estremo libero, l'asta rimane in campo elastico, successivi incrementi di carico denotano la plasticizzazione della sezione incastrata fino alla rottura per schianto registrata a 200 N; nell'ipotesi elastico-lineare, la massima tensione per $F=150$ N vale:

$$\sigma = DF/2l = 543 \text{ Mpa}$$

Per tarare nel modello FEM il superamento della soglia elastica e il limite di rottura del materiale elasto-fragile, sono state svolte, in regime di non linearità geometrica e meccanica, analisi statiche ad incremento di carico seguite, per opportuni step deformativi, da analisi *time history*. Si simula

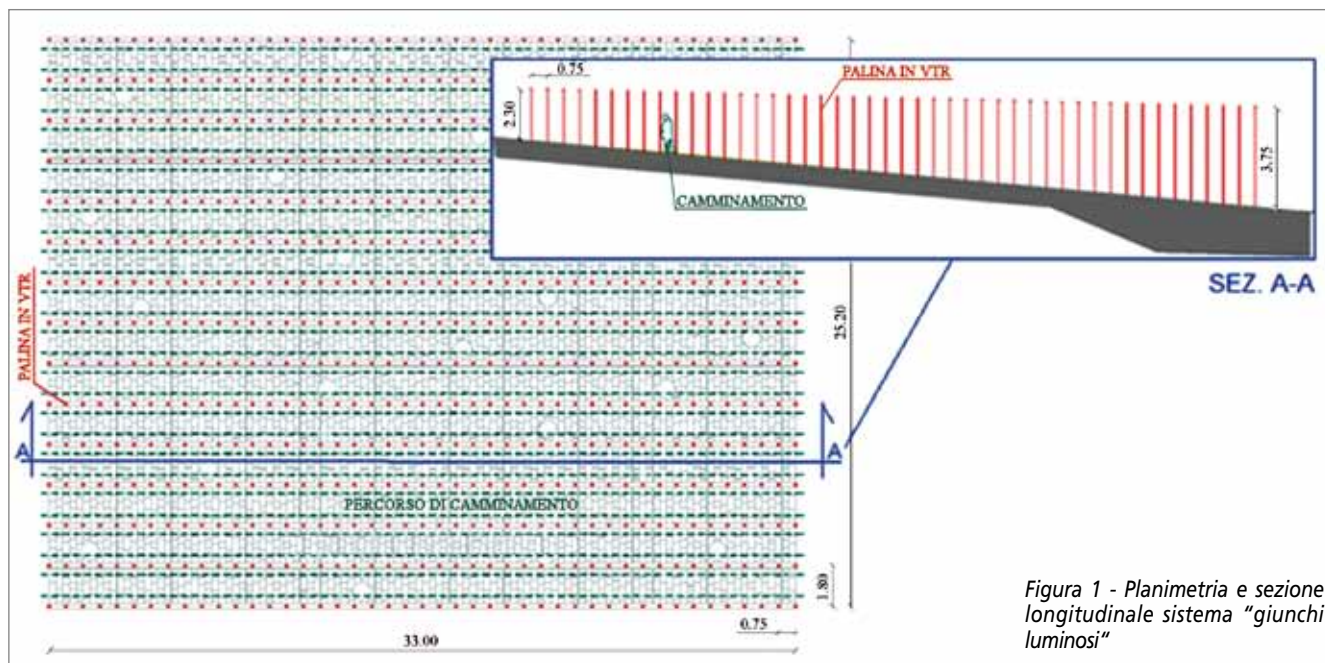


Figura 1 - Planimetria e sezione longitudinale sistema "giunchi luminosi"

l'applicazione lenta del carico e il repentino rilascio con oscillazioni libere smorzate, la cui risposta individua soglie di comportamento, funzione dell'incremento relativi al diagramma momento-curvatura ($M-\chi$) della sezione di estremità degenerano in una retta, il giunco è ancora in campo elastico, altrimenti si sono avute deformazioni plastiche; quando, per lo step di carico successivo,

non si hanno più oscillazioni, si è individuato il limite di rottura del materiale con conseguente perdita di energia elastica. In figura 3 sono riportati i risultati del modello FEM ottimizzato per due step di carico: il primo ($F = 160$ N) individua il passaggio dalla soglia elastica a plastica, il secondo ($F = 200$ N) quello che precede la rottura. Le soglie sono state individuate dalla lettura dei cicli isteretici $M-\chi$

riportati in figura 4 per i due step esaminati.

Filare di giunchi luminosi

Il filare di giunchi luminosi, parallelo al percorso di camminamento, è costituito da n. 46 giunchi ad altezza variabile (figura 1) collegati in testa mediante cavo in acciaio con diametro 1,5 mm. Al fine di individuare i parametri che governano la dinamica del modello FEM (smorzamento e

masse), sono state eseguite prove in sito: spostando lentamente la testa del primo giunco di 1,5 m nella direzione ortogonale alla direzione del filare e rilasciando improvvisamente, sono state effettuate n. 4 registrazioni dello spostamento trasversale per ogni ciclo di oscillazione; i risultati sono riportati in figura 5. Ai fini di una corretta modellazione, i cavi in acciaio, privi di rigidità flessionale ed instabili

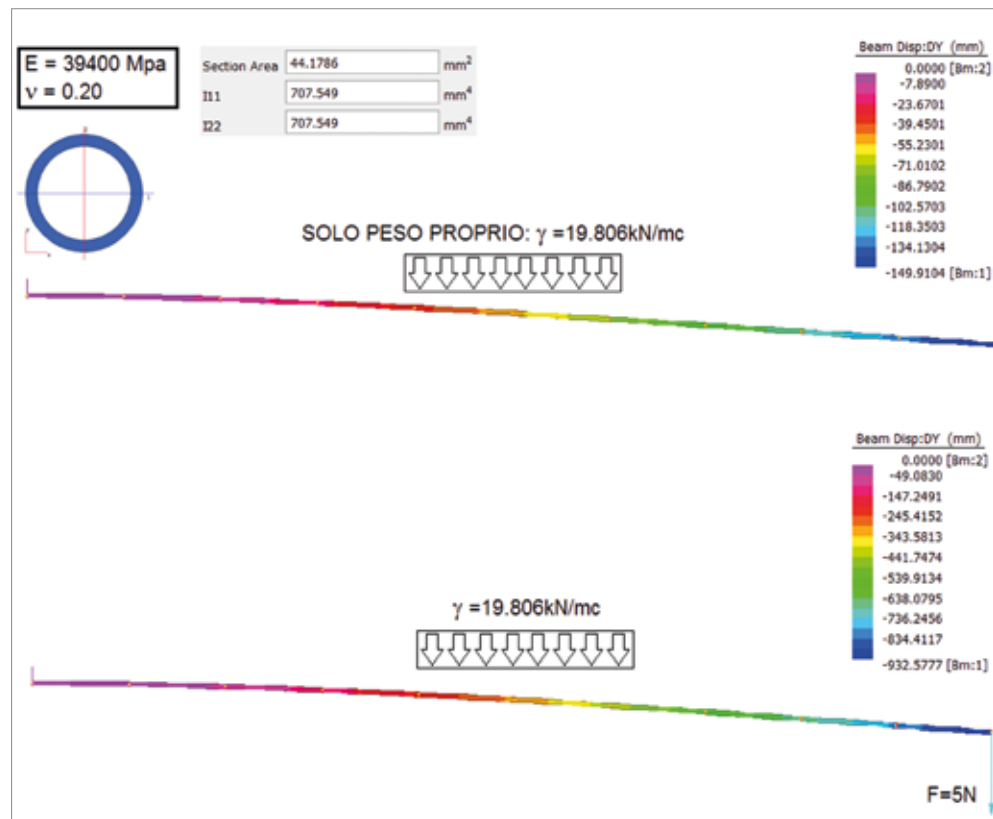


Figura 2 - Taratura proprietà elastiche: colormap degli spostamenti verticali

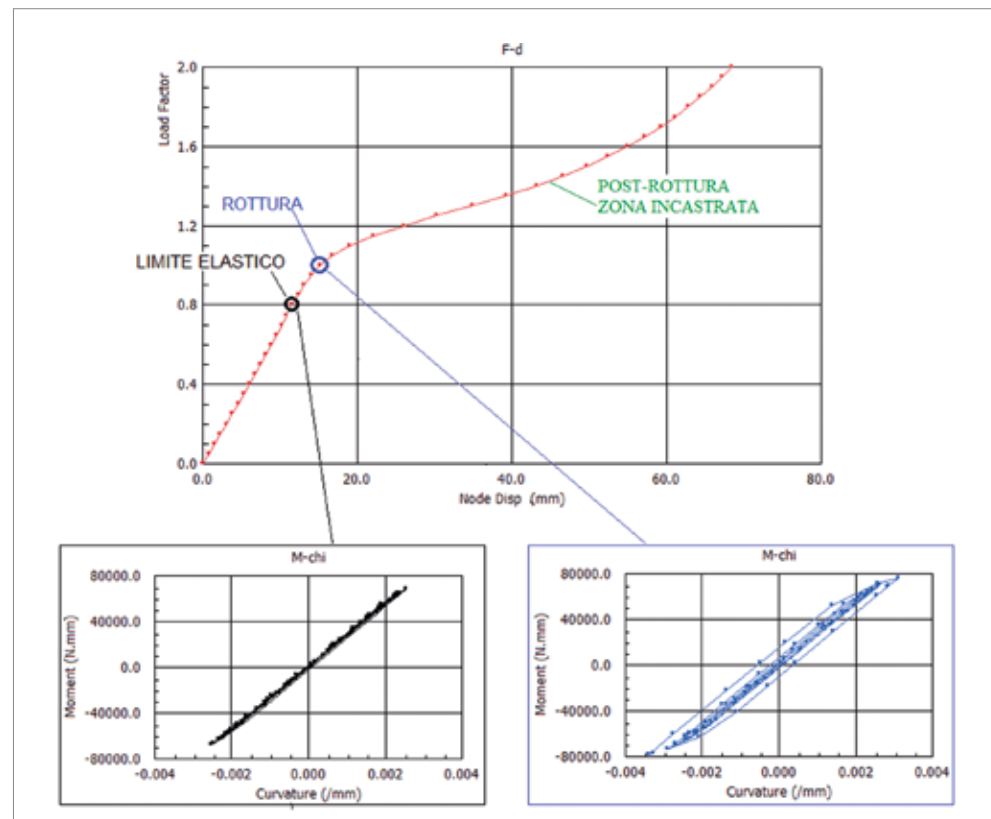


Figura 4 - Cicli isteretici $M-\chi$ derivanti da time history su configurazioni deformate

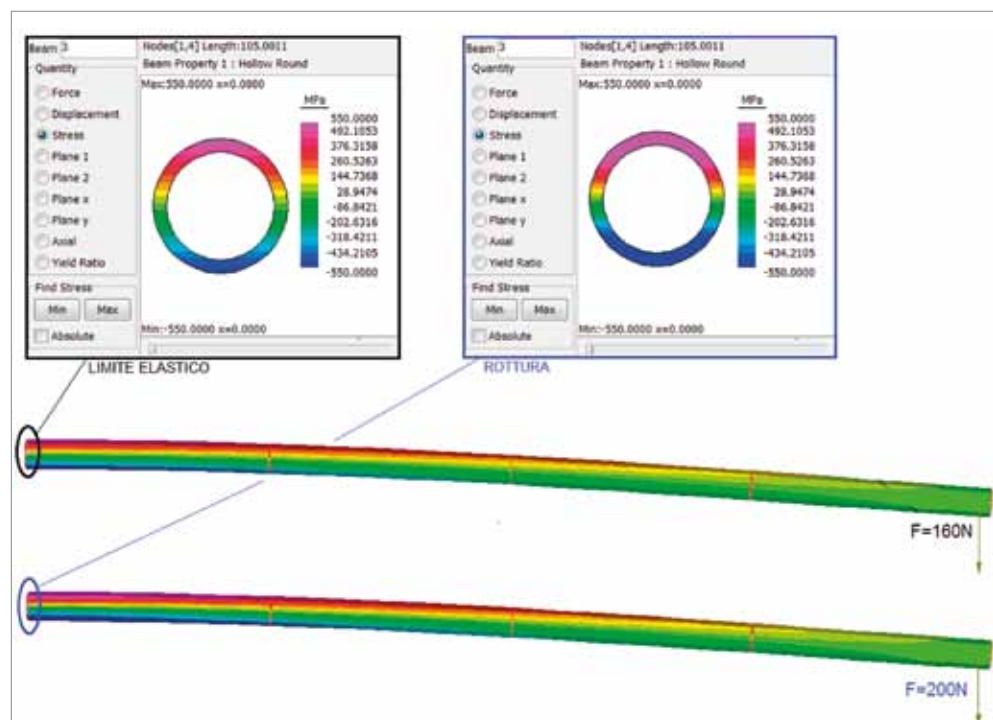
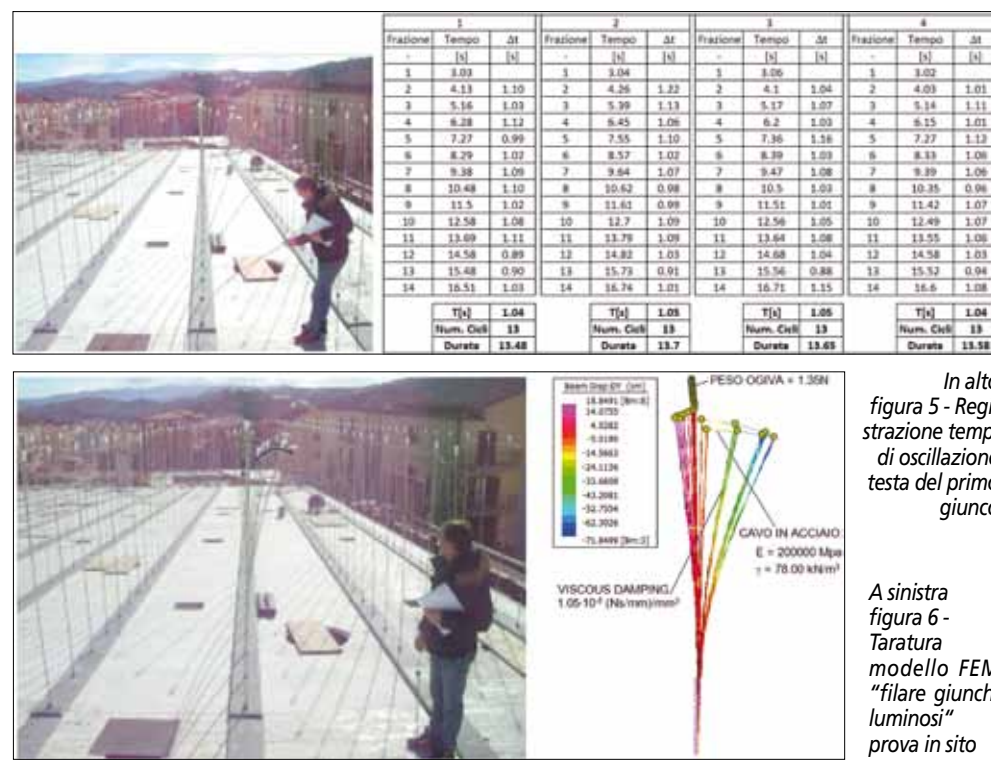


Figura 3 - Determinazione legame costitutivo materiale VTR: analisi statica non lineare



In alto figura 5 - Registrazione tempi di oscillazione testa del primo giunco

A sinistra figura 6 - Taratura modello FEM "filare giunchi luminosi" prova in sito

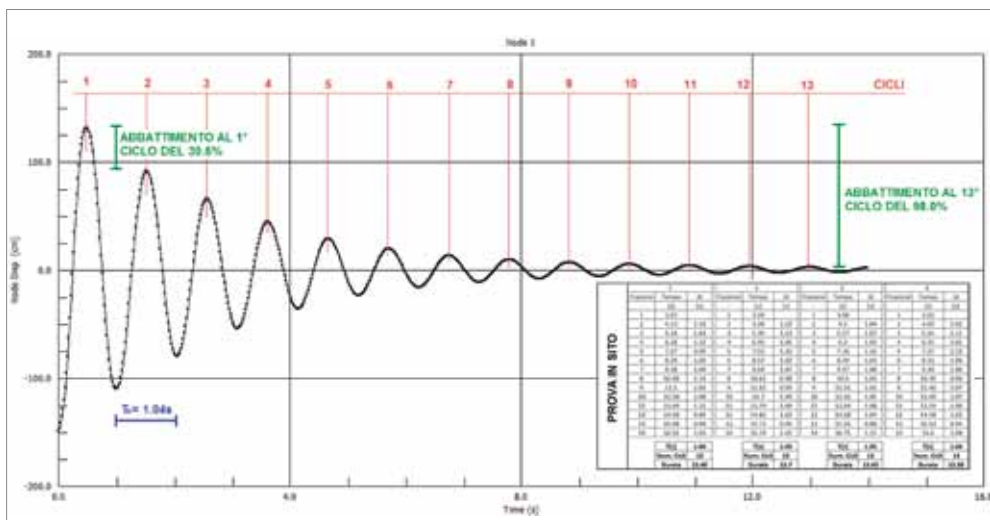


Figura 7 - Diagramma temporale spostamento trasversale testa del primo giunco

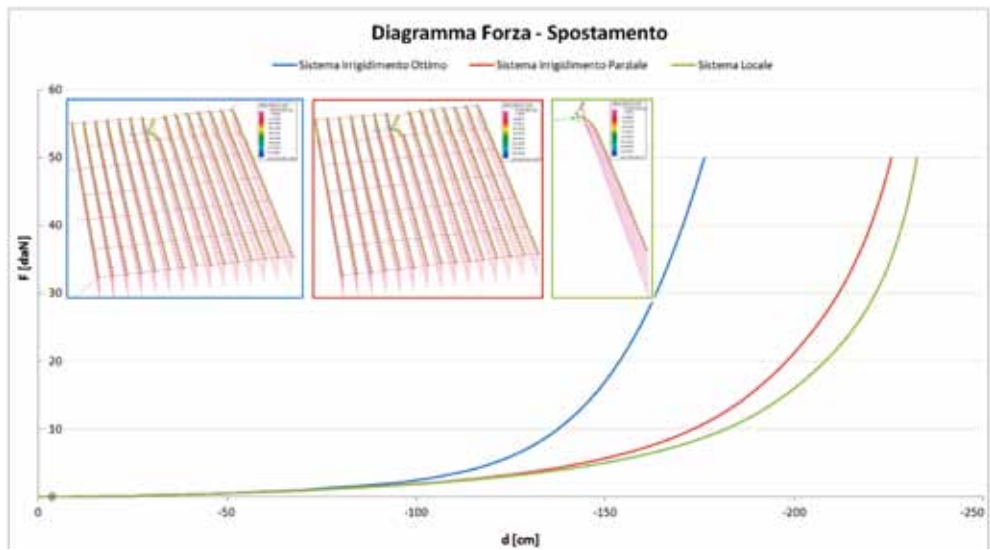


Figura 9 - Risultati analisi statica non lineare per simulazione di azione vandalica

lateralmente, sono stati modellati con elementi *beam* aventi la caratteristica di deformarsi secondo la catenaria per effetto del peso proprio, fornendo rigidità assiale soltanto quando in trazione; lo smorzamento viscoso è stato considerato intrinseco del "VTR" assegnando perciò un valore per unità di volume *viscous damping* alle proprietà del materiale, mentre sono stati trascurati altri contributi che esulano dagli scopi della presente quali lo smorzamento aerodinamico. Nelle figure 6 e 7 si riportano i risultati del confronto tra il modello FEM ottimizzato e le prove in sito.

Eccessiva deformabilità

Il sistema "giunghi luminosi" originariamente denotava due problematiche: 1) L'assenza di collegamenti trasversali rendeva i singoli filari indipendenti tra di loro; l'eccessiva deformabilità, unita ad oscillazioni libere indipendenti, ostacolava il percorso di camminamento anche per piccole folate di vento; 2) il sistema così concepito era troppo esile per cui anche un bambino che gioca avrebbe potuto provocare la rottura. Da qui l'idea di collegare i giunghi luminosi lungo allineamenti trasversali opportuni, con gli stessi cavi utilizzati per la connessione longitudinale: ciò risolveva il problema dei filari indipendenti migliorando oltretutto l'aspetto estetico notturno con la visione di un sistema unico in movimento, ma non risolveva il problema dell'eccessiva deformabilità; la

soluzione constava nel collegamento a terra di alcune paline perimetrali. Il dimensionamento del numero di connessioni trasversali e dei collegamenti a terra (figura 8) è stato ottimizzato attraverso un compromesso tra maggiore rigidità da una parte e minore energia elastica di rilascio dall'altra: è necessario cioè irrigidire il sistema così da ridurre gli spostamenti trasversali ed aumentare la robustezza nei confronti di azioni vandaliche o accidentali; viceversa bisogna limitare la rigidità per conservare l'effetto ondeggiante per le azioni ordinarie da vento, ma soprattutto contenere l'energia elastica di rilascio a seguito di azione vandalica per limitare l'impatto con il pedone.

Le figure 9 e 10 riportano i risultati conclusivi ottenuti dalle analisi *time history* a partire da configurazioni deformate derivanti da analisi statiche non lineari; si simula l'azione vandalica che consiste nel tirare il giunco dalla parte sommitale fino a raggiungere uno spostamento trasversale di 1,5 m, con rilascio improvviso cui seguono oscillazioni libere smorzate. Il confronto numerico è effettuato tra tre modelli FEM differenti: 1) "Sistema Locale" che simula il singolo filare di giunghi luminosi indipendente; 2) "Sistema Irrigidimento Parziale" che simula l'irrigidimento mediante le sole connessioni trasversali; 3) "Sistema Irrigidimento Ottimo" che simula l'irrigidimento

mediante n. 8 collegamenti a terra. La figura 9 chiarisce il sensibile incremento di robustezza ottenuto con il "Sistema Irrigidimento Ottimo"; si fa osservare che la non linearità delle curve F-d è esclusivamente dovuta ai grandi spostamenti dato lo stato tensionale negli elementi molto al di sotto della soglia elastica. Si nota che per spostare di $\delta=1,5$ m la testa del giunco del sistema più rigido si deve applicare un'azione orizzontale di $F = 17$ kg, mentre per il "Sistema Locale" basta una forza di $F = 5$ kg, esercitabile anche da un bambino. Quanto ottenuto è un risultato estremamente positivo se si osservano i risultati delle *time history* riportati in figura 10: si nota la riduzione del periodo di oscillazione per i sistemi più rigidi con *modesto incremento delle velocità*, quindi dell'energia cinetica di rilascio che influenza la forza d'impatto dell'ogiva sul pedone secondo il teorema dell'impulso.

Vulnerabilità del giunco

Le aste costituenti il giunco luminoso venivano prodotte in stabilimento con altezze standard pari a 2,2 m; poiché le altezze di progetto erano superiori a tale soglia si rendeva necessaria la definizione di un giunco in grado di ripristinare la continuità dell'elemento. Originariamente si era prevista un'unione costituita da un'anima interna in VTR a sezione tubolare cava di diametro $D = 10$ mm e spessore $s = 1$ mm, incollata in prossimità del giunco

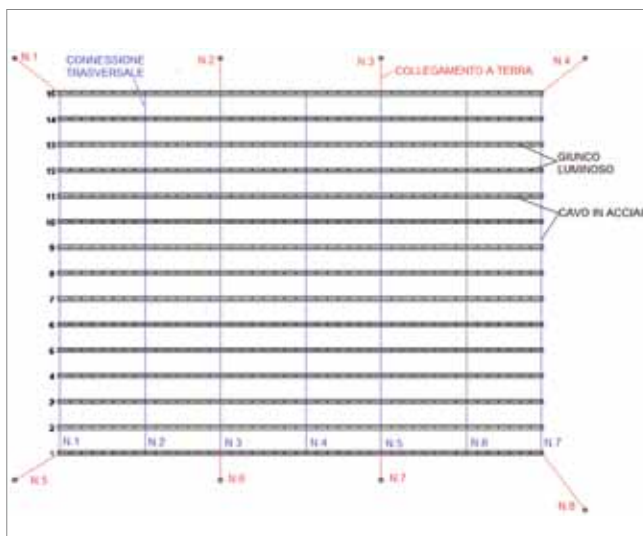


Figura 8 - Planimetrie sistema "giunghi luminosi" irrigidito con connessioni trasversali e collegamenti a terra

per una lunghezza di 20 cm. In seguito alla messa in opera di alcune unioni, sono state eseguite prove con applicazione di una forza orizzontale in prossimità del giunco che provocavano la rottura fragile dello stesso. Da qui la necessità della messa a punto di un modello in grado innanzitutto di riprodurre il fenomeno, quindi permettere di trovare la migliore soluzione per rendere il giunco "elemento forte" (ultimo elemento a rompersi) e non "elemento debole". A tal fine è stato realizzato un modello FEM locale costituito da un solo giunco luminoso di altezza 3,5 m opportunamente *meshato* con elementi *beam*, mentre elementi *spring-damper* simulano la rigidità e lo smorzamento viscoso ottenuti dal modello globale "Sistema Irrigidimento Ottimo". Anche l'anima interna in VTR è modellata con elementi *beam* sovrapposti a quelli rappresentativi dei giunghi; in corrispondenza dell'unione tali

elementi sono continui (incastro interno), mentre quelli che modellano il giunco presentano sconnessioni nel nodo in comune, sia traslazioni che rotazionali. In figura 11 sono sintetizzati i risultati dell'analisi statica con non linearità geometrica e meccanica, che simulano la prova effettuata in sito: si vede che nell'estremo dove è presente la connessione dei giunghi l'unica sezione a "lavorare" è quella costituita dall'anima interna con diametro e spessore ridotti, quindi minore inerzia ed aumento dello stato tensionale con conseguente rottura prematura del giunco (elemento debole) per F circa uguale a 21 kg. La soluzione più semplice e logica è quella di aumentare la sezione resistente in corrispondenza della discontinuità attraverso l'aggiunta di un'anima esterna in VTR a sezione tubolare cava di diametro $D = 14.5$ mm e spes-

sore $s = 1$ mm incollata per una lunghezza complessiva di 20 cm. I risultati di figura 12, ottenuti dalla riesecuzione delle analisi, chiariscono l'efficacia dell'intervento con l'unione che diventa "elemento forte": quando si raggiunge la rottura nella sezione di incastro del giunco per un'azione di F circa uguale a 92 kg, l'anima esterna è ancora in campo elastico.

Bibliografia

- Straus7, *Theoretical Manual - Theoretical background to the Straus7 finite element analysis system*, 1° Edition, G+D Computing, 2004.
- MEIROVITC L., *Element of vibration Analysis*, 2nd Edition, McGraw-Hill, 1986.
- CLOUGH, R.W., and PENZIEN, J., *Dynamics of structures*, 2nd Edition, McGraw-Hill, 1993.
- ANDREAUS U., PLACIDI L., REGA G., *Numerical simulation of the soft contact dynamics of an impacting bilinear oscillator*, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 15, Issue 9, pp. 2603-2616, 2010.
- AGARWAL B.D., PLACIDI, AND BROUTMAN L.J., *Analysis and Performance of Fiber Composites*, Wiley, 1980.
- ANAND L., *A constitutive model for Compressible Elastometric Solids*, *Computational Mechanics*, Vol. 18, pp 339-355, 1996.
- BATHE K. J., *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice-Hall, 1982.
- ZIENKIEWICZ O. C., and Taylor, R. L., *The Finite Element Method*, 5th Edition; McGraw-Hill, London, 2001.

*Ingegnere, Planning Workshop s.r.l.

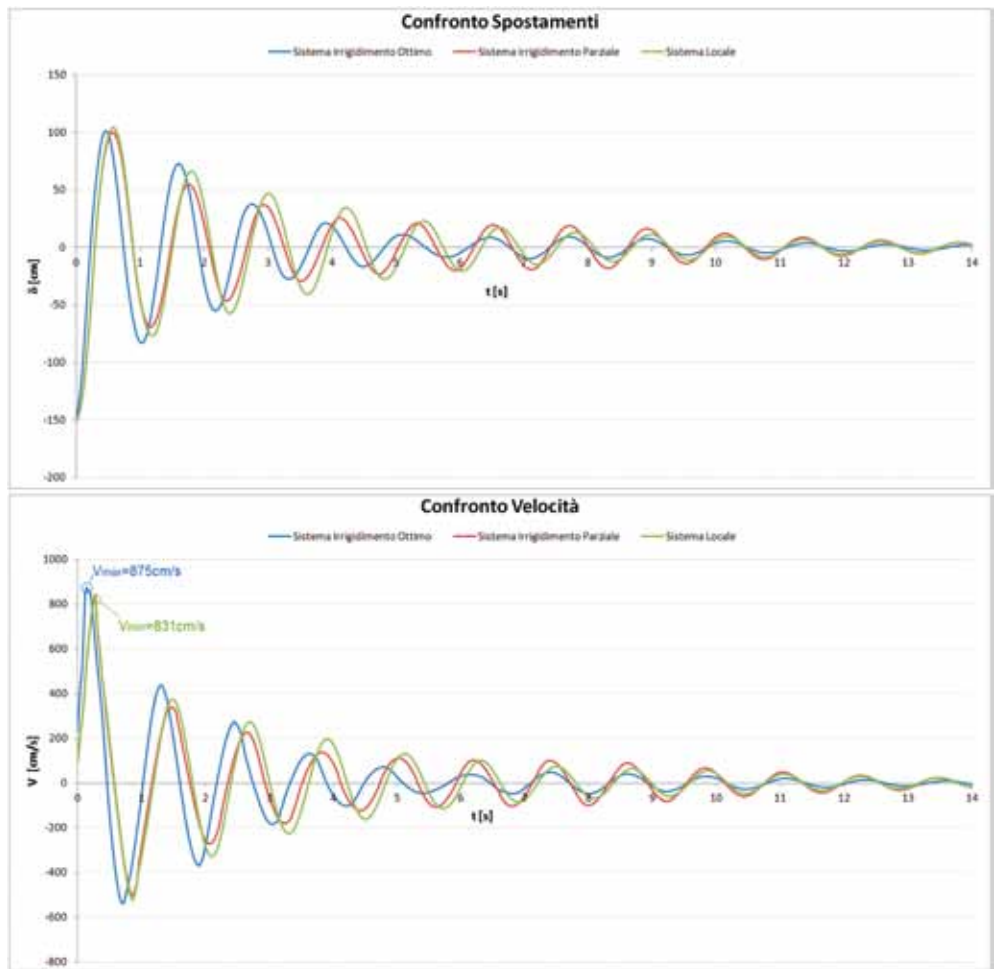


Figura 10 - Risultati analisi time history per simulazione azione vandalica

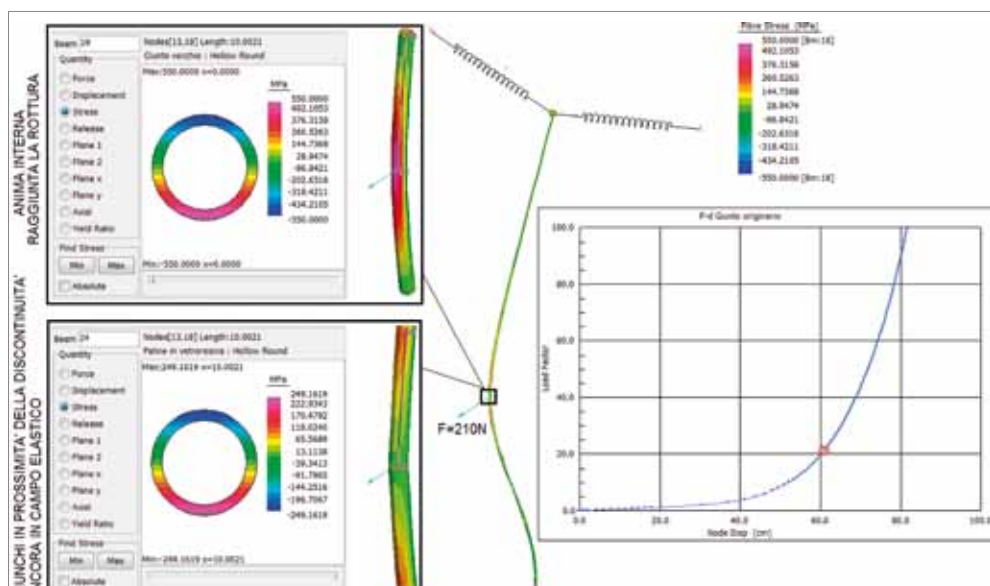


Figura 11 - Analisi statica non lineare: fibre stress in prossimità giunco originario

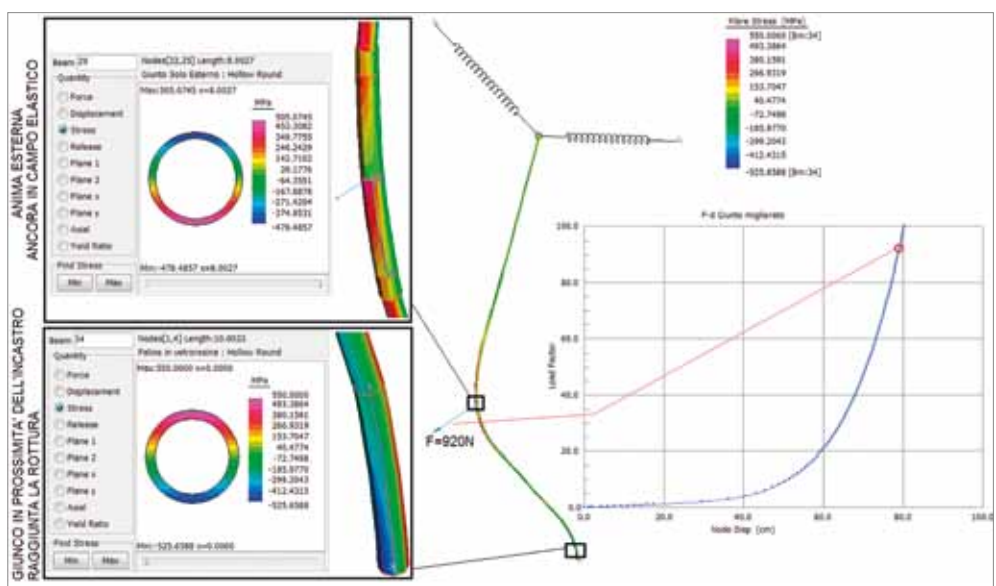


Figura 12 - Analisi statica non lineare: fibre stress in prossimità giunco rinforzato