

Strutture duttili in vetro e acciaio inox: le Travi Vitree Tensegrity

Prof. Ing. M. Froli, Dr. Ing. L. Lani
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Pisa

Introduzione

La duttilità è una proprietà strutturale frequentemente associata ai materiali metallici in grado di deformarsi plasticamente. Al contrario la fragilità, caratteristica principale dei materiali ceramici e vetrosi, comporta una rottura improvvisa ed incontrollata, quindi molto più temibile e pericolosa.

Tuttavia, alcuni famosi e pionieristici esempi di costruzioni vitree in zona sismica, quali l'Haus Pavilion a Rheinbach (Ludwig & Weiler), la pensilina Yurakucho a Tokyo (MacFarlane), la grande scalinata posta all'interno dell'Apple Store di San Francisco (Eckersley O'Callaghan Structural Design) dimostrano che è possibile impiegare realmente strutture in vetro anche in siti dove possono notoriamente verificarsi eventi sismici di media ed elevata intensità che impongono alle strutture il requisito della duttilità.

La resistenza di un elemento in vetro strutturale, sottoposto ad una sollecitazione crescente, è, come noto, influenzata da molteplici fatto-

ri quali temperatura, umidità, modalità di carico, caratteristiche geometriche dell'elemento [1] ma, in condizioni ambientali normali, il vetro è meccanicamente assimilabile ad un materiale isotropo elastico lineare, incapace di subire deformazioni plastiche. Dunque, essendo pressoché privo di tenacità, anche microscopiche imperfezioni superficiali possono comprometterne la resistenza a trazione. Viceversa, esso risulta estremamente resistente a compressione, sviluppando tensioni di rottura dell'ordine di 1000 MPa.

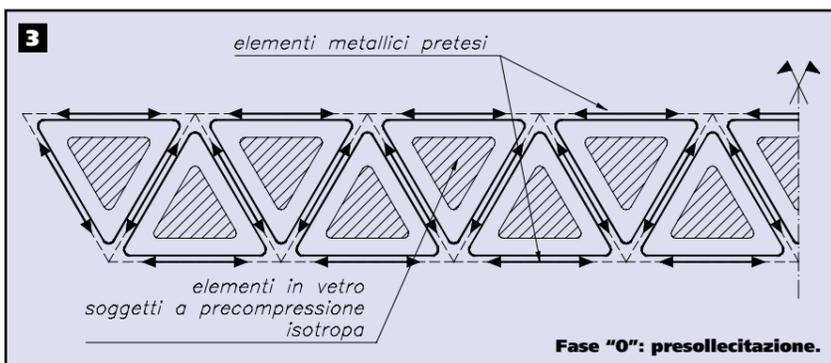
La resistenza a trazione e agli urti può essere però sensibilmente migliorata con gli ormai consolidati trattamenti di tempra (chimica e termica) che inducono uno stato di compressione superficiale residuo, capace di inibire così l'iniziazione delle cricche [2]. La tempra non ha, però, nessun effetto sulla fragilità del materiale, che rimane praticamente inalterata [3]. In altre parole, una volta raggiunta la lunghezza critica, che nel vetro è di pochi micron, la fessura si propaga istantaneamente in modo incontrollato e proprio questa intrinseca fragilità ha escluso, per un lungo periodo, il vetro dai materiali da costruzione [4]. La fragilità del vetro può essere aggirata applicando i due concetti fondamentali su cui si basa la progettazione di strutture in vetro: la gerarchia e la ridondanza [5] ossia, rispettivamente, garantendo più "linee difensive" contro il rischio del collasso e disponendo in parallelo elementi resistenti che svolgono la stessa funzione portante. È proprio nell'applicazione di questi due principi che si basa la concezione delle travi TVT, come spiegato di seguito.



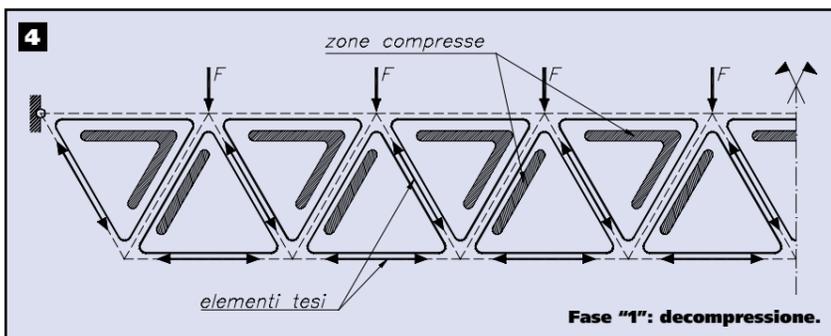
Nodi metallici in acciaio inox.



Prototipo TVTα.



Fase "0": presollecitazione.



Fase "1": decompressione.

LA CONCEZIONE STRUTTURALE E IL COMPORTAMENTO STRUTTURALE QUALITATIVO DELLE TRAVI TVT

La concezione strutturale

Il sistema costruttivo delle travi TVT scaturisce dall'idea di assemblare senza foratura due ordini paralleli – dunque ridondanti – di pannelli triangolari in vetro, attraverso un doppio sistema di barre pretese (o cavi) in acciaio inox EN 1.4401 (AISI 316) che confluiscono insieme ai vertici degli elementi vetrei in nodi sempre in inox AISI 316, come illustrato in figura 1.

I pannelli sono composti da due strati di 5 mm temprati chimicamente [6] e laminati mediante strato di PVB da 1.52 mm.

I nodi metallici (figura 2) sono stati lavorati con taglio laser e sottoposti a fresatura per ottenere degli alloggiamenti circolari che accolgono, tramite un materiale soffice di interposizione, i vertici arrotondati dei triangoli di vetro. Sempre nei nodi, sono praticati dei fori filettati nei quali vengono avvitate le estremità dei tiranti di acciaio.

Sottoponendo i tiranti a trazione, i pannelli di vetro vengono spinti in corrispondenza dei loro vertici contro i nodi di acciaio che reagiscono imprimendo ai pannelli forze di compressione agenti quasi sulla bisettrice dei vertici stessi e suscitando quindi, nei pannelli, uno stato di compressione benefico pressoché isotropo.

Il vincolo offerto dagli alloggiamenti metallici ai vertici dei pannelli è d'altra parte di puro contatto, ossia in grado di sviluppare pressioni e di interrompere per distacco la trasmissione di trazioni nocive al vetro.

Dal punto di vista dell'industrializzazione della costruzione, si osserva che i nodi inox non cambiano al variare delle dimensioni (altezza e luce) della trave, grazie alla forma triangolare equilatera dei pannelli di vetro.

La fase di assemblaggio di una trave TVT, nel corso della quale essa viene distesa su un piano orizzontale e sottoposta alle precedenti operazioni di precompressione, è stata denominata Fase "0". In questa fase la trave è ancora esente da carichi esterni, compreso il proprio peso che viene, infatti, assorbito interamente dal piano di appoggio (Fase "0", figura 3).

Incrementando ulteriormente i carichi, si ottiene la progressiva diminuzione della trazione nel tirante superiore fino al suo sbandamento (Fase "2", instabilità) che lo esclude dallo schema statico a partire da questo istante.

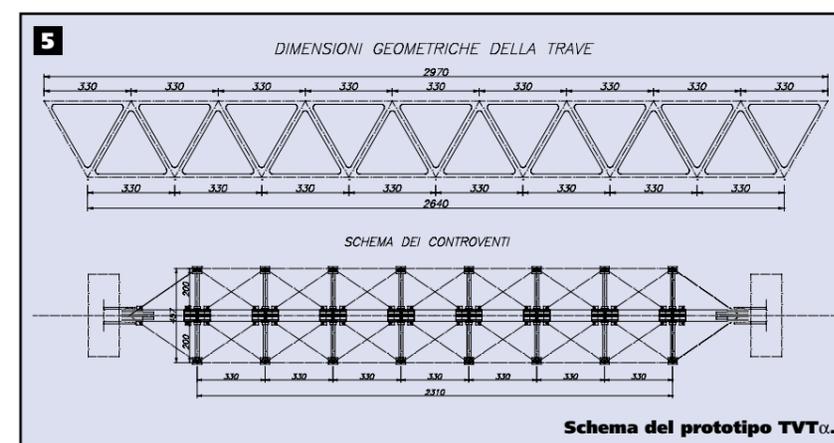
Andando oltre la Fase "2", le azioni di compressione sono assorbite esclusivamente dai pannelli di vetro e quelle di trazione dall'acciaio inox fino al raggiungimento della Fase "3", finale o di collasso, in cui il tirante inferiore raggiunge il limite elastico e, snervandosi, consente di avere una rottura di tipo duttile con sviluppo di grandi deformazioni prima che il vetro raggiunga e superi la sua resistenza a compressione.

I prototipi TVTα e TVTβ

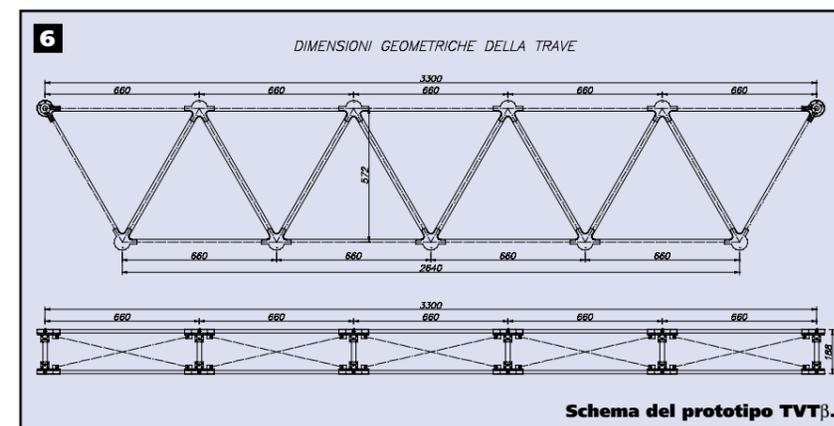
Sono stati finora allestiti due prototipi di questa linea di travi. Il primo, denominato TVTα, era costituito da 17 pannelli triangolari equilateri di vetro, aventi lato di circa 330 mm. La trave aveva luce di 2970 mm, con un rapporto altezza/luce (h/L) pari a 1/9 ed era stata equipaggiata con tiranti in barre da 6 mm, provviste di tenditore (v. figura 5). I due ordini di pannelli erano disposti in parallelo a una distanza reciproca di 25 mm.

Al fine di contrastare fenomeni di instabilità flessotorsionale, il lembo superiore della trave è stato munito di un controvento reticolare a doppie maglie di S. Andrea (v. figura 5).

Il secondo prototipo, TVTβ, differisce sostanzialmente dal primo anzitutto per il maggiore rapporto h/L pari a 1/6. I pannelli di vetro di questo esemplare presentano infatti lato doppio rispetto a quello della TVTα anche se gli spessori, il tipo di tempra e il tipo di inter-



Schema del prototipo TVTα.



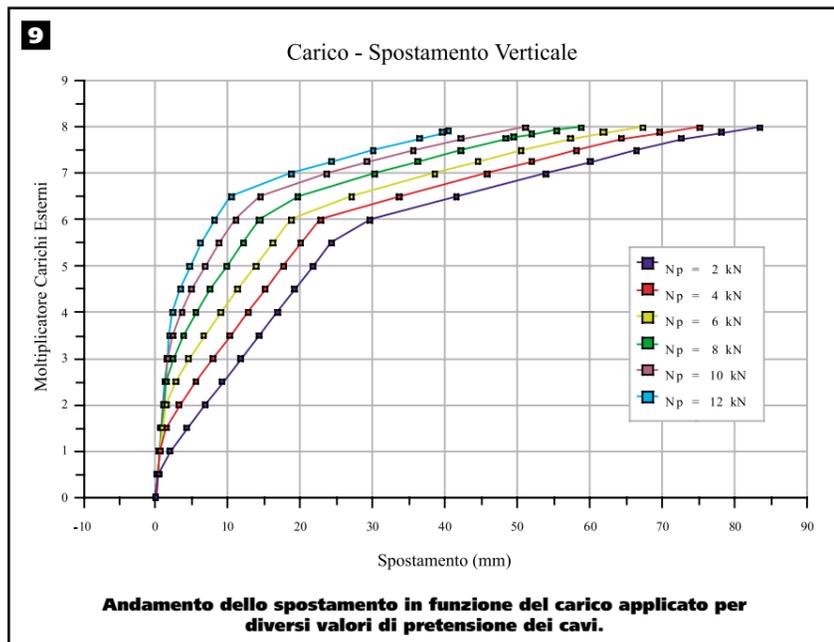
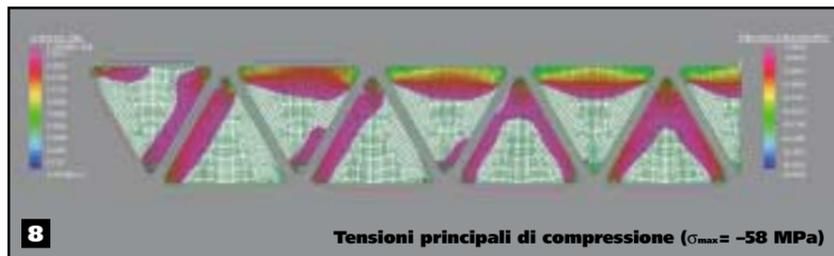
Schema del prototipo TVTβ.



Prototipo TVTβ.

layer sono gli stessi.

Per aumentare il grado di stabilità flessotorsionale, le due pareti parallele sono state allontanate tra loro e poste ad una distanza di 190 mm. I correnti superiori delle due pareti sono stati collegati mutuamente mediante un controvento reticolare a croci di S. Andrea (v. figura 6) e per facilitare le operazioni di montaggio le barre sono state sostituite da cavetti spirroidali in acciaio inox muniti di tenditori (v. figura 7).



Prototipo TVT α in fase di sperimentazione.

Modellazione numerica

Il comportamento strutturale dei prototipi TVT α e TVT β è stato simulato, dal punto di vista teorico, con l'ausilio di modelli matematici agli Elementi Finiti (FEM), in grado di cogliere i numerosi aspetti meccanici che interessano le due travi. Sono stati impiegati elementi finiti sofisticati in grado di descrivere il contatto vetro/nodo metallico e l'incapacità delle funi metalliche di resistere a stati di compressione. L'analisi numerica della trave TVT α ha permesso di confermare il comportamento ipotizzato in fase di ideazione e di individuare i vari stati limite della struttura. In **figura 8** è rappresentata la mappatura delle tensioni principali di compressione sul vetro in corrispondenza dello snervamento della barra inferiore ed evidenziate le com-

pressioni trasmesse dal vetro e le trazioni assorbite dalle barre metalliche.

L'analisi FEM eseguita sulla trave TVT β ha consentito di approfondire l'effetto della pretensione dei cavi sulla rigidità della trave. Inoltre, sono state effettuate analisi di stabilità a svergolamento per valutare la rigidità torsionale di questo secondo prototipo. In **figura 9** è rappresentato, a titolo di esempio, l'andamento degli spostamenti verticali in mezzera in funzione della pretensione applicata ai cavi metallici. Aumentando il tiro iniziale sui tiranti è quindi possibile migliorare la rigidità della trave, anche se questo non comporta alcuna variazione sensibile sulla resistenza della struttura, come evidenziato dallo stesso diagramma.

Analisi sperimentale

La sperimentazione sul prototipo TVT α (**figura 10**) ha evidenziato il buon funzionamento della trave. In particolare il sistema di vincolo tra nodo metallico ed elementi in vetro garantisce effettivamente la trasmissione dei soli sforzi di compressione preservando il vetro da trazioni potenzialmente pericolose. Il carico massimo raggiunto è stato praticamente il medesimo di quello teorico e, a prova ultimata, i pannelli di vetro completamente frammentati sono stati due, indice del buon funzionamento del sistema strutturale.

Il prototipo TVT β è allo stato attuale completamente allestito e sono corso prove preliminari per l'individuazione di eventuali deformazioni differite e cadute di tensione. Successivamente, saranno eseguite prove di caratterizzazione dinamica e quindi prove di carico fino a rottura.

Ringraziamenti

La presente ricerca fa parte di un più vasto programma finanziato nel 2005 da Ministero Italiano dell'Università e della Ricerca (MIUR), nell'ambito dei Programmi di Ricerca di Rilevante Interesse Nazionale (PRIN). Gli autori intendono ringraziare il personale tecnico del Laboratorio di Ingegneria Strutturale tra cui in modo particolare il p.i. Michele Di Ruscio per gli allestimenti delle prove sperimentali, nonché gli studenti ed i laureandi che hanno offerto la loro collaborazione, con particolare riferimento al laureando Stefano Serracchiani.

Riferimenti bibliografici

- [1] J. Mencik, *Strength and Fracture of Glass and Ceramics*, Elsevier, London, 1992.
- [2] M. Froli, L. Lani, *Prove di resistenza del vetro temperato*, La Rivista del Vetro, n. 7, ottobre 2005.
- [3] G. Sedlacek, *Ein Bemessungskonzept zur Festigkeit thermisch vorgespannter Gläser*, Shaker Verlag, Aachen, 2000
- [4] A. Kott, T. Vogel, *Safety of Laminated Glass Structures After Initial Failure*, *Structural Engineering International*, SEI Volume 14, Number 2, IABSE, Switzerland, 2004.
- [5] P. Rice, H. Dutton, *Structural Glass*, Spon Press, 2nd edition, London, 2004.
- [6] G. Macrelli, *Process Control Methods for Chemical Strengthening of Glass on Industrial Scale*, Proc. XIX Int. Cong. Glass, Edinburgh, 2001.