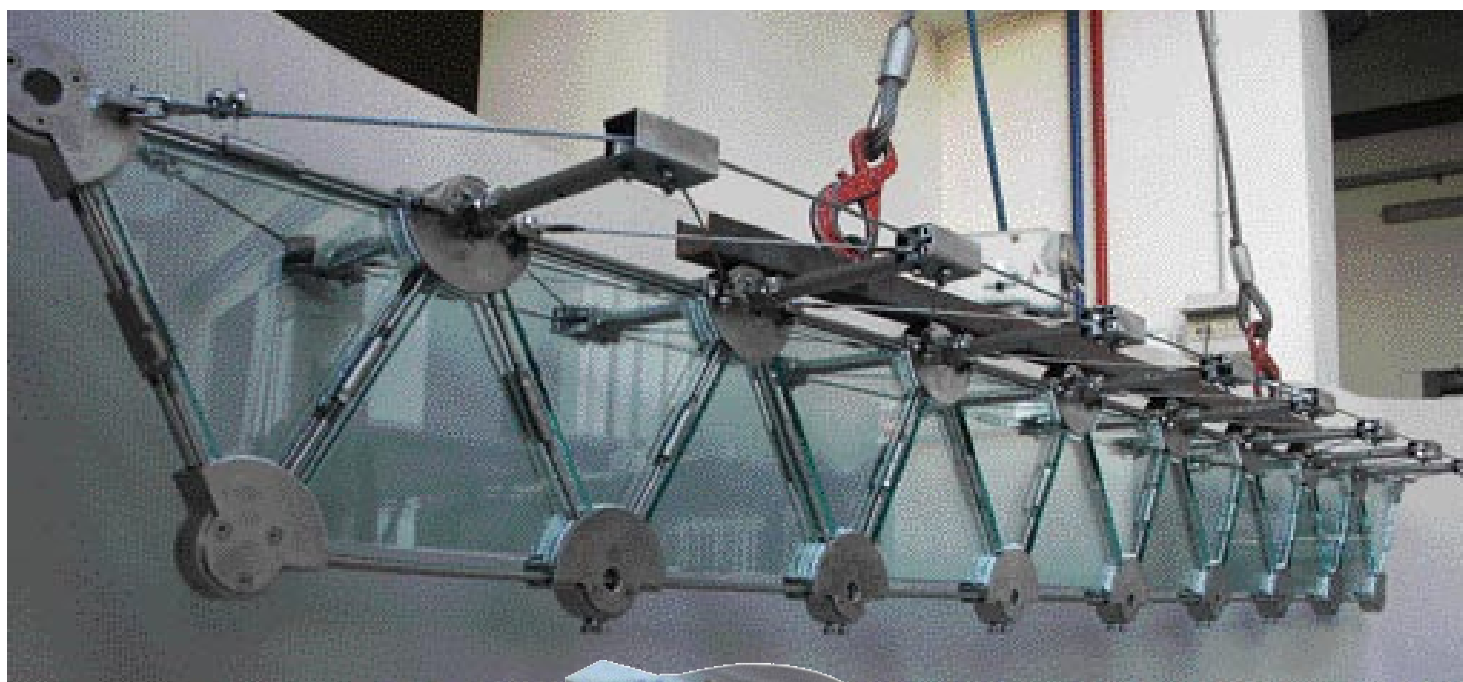


**Le TVT**, Travi Vitree Tensegrity

Prof. ing. Maurizio Froli, dott. ing. Leonardo Lani - Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Pisa

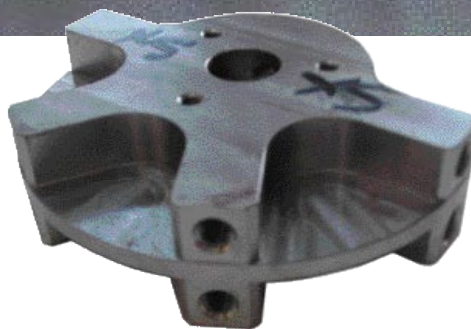
## Strutture duttili in vetro

Concezione costruttiva e principio di funzionamento statico di una nuova tipologia di travi, realizzate mediante pannelli di vetro uniti tra loro tramite componenti in acciaio inox.

**Fig. 1 - Prototipo TVT $\alpha$ .**

L'idea di base è quella di anticipare e pilotare la frattura del vetro decomponendolo in elementi modulari triangolari i quali vengono, successivamente e reciprocamente, uniti mediante precompressione esplicata da cavi in acciaio inox pretesi opportunamente disposti.

Il principio della "Tensile Integrity" presiede, quindi, la compagine di queste travi che, pertanto, sono state denominate Travi Vitree Tensegrity, in acronimo: TVT. Attraverso questa particolare tecnologia, ideata e brevettata per l'Università di Pisa dal primo degli autori, il vetro è soggetto prevalentemente a compressione e il collasso finale della struttura avviene per snervamento dell'acciaio, ossia con caratteristiche di duttilità.

**Fig. 2 - Nodi metallici** in acciaio inox.

Il primo prototipo (TVT  $\alpha$ ) di questa linea di travi è stato sottoposto a simulazioni numeriche e a prove di carico presso il Laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Pisa, mentre il secondo prototipo (TVT  $\beta$ ) è già stato costruito ed è attualmente in corso di sperimentazione e di analisi FEM.

**Vetro: duttilità e fragilità**

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 e incontrollata, quindi molto più temibile e pericolosa.

Tuttavia, alcuni famosi e pionieristici esempi di costruzioni vitree in zona sismica, quali Haus Pavilion a Rheinbach (Ludwig & Weiler), la pensilina Yurakucho a Tokio (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 no-

toriamente 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 a una sollecitazione crescente è, come noto, influenzata da molteplici fattori, quali temperatura, umidità, modalità di carico, caratteristiche geometriche dell'elemento<sup>[1]</sup>, ma, in condizioni ambientali normali, il vetro è meccanicamente assimilabile a 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 tempera (chimica e termica), che inducono uno stato di compressione superficiale residuo capace di inibire, così, la iniziazione delle cricche [2]. La tempera non ha, però, alcun effetto sulla fragilità del materiale, che rimane praticamente inalterata<sup>[3]</sup>. 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<sup>[4]</sup>.

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<sup>[5]</sup>, ossia, rispettivamente, garantendo più "linee difensive" contro il rischio del collasso e disponendo in parallelo elementi resistenti che svolgono la stessa funzione portante. Ed è proprio nella applicazione di questi due principi che si basa la concezione delle travi TVT.

### Travi TVT: concezione e comportamento strutturali

Il sistema costruttivo delle travi TVT scaturisce dall'idea di assemblare senza foratura due ordini paralleli - dunque ridondanti - di

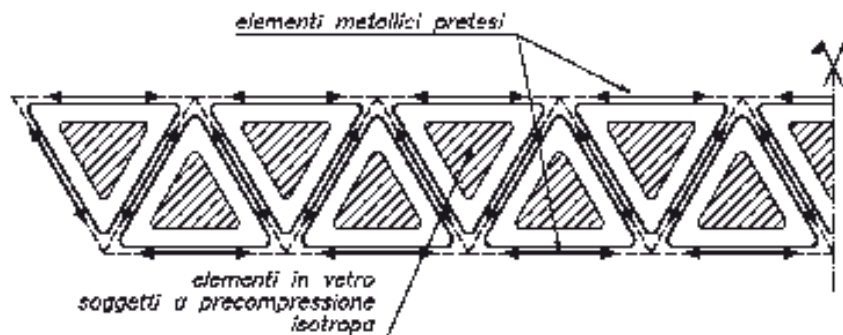


Fig. 3 - Fase "0": presollecitazione.

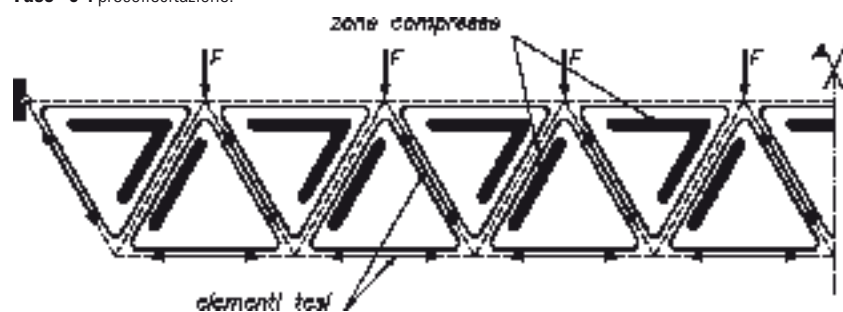


Fig. 4 - Fase "1": decompressione.

pannelli triangolari in vetro attraverso un doppio sistema di barre pretese (o cavi) in acciaio (inox Aisi 316) che confluiscono, insieme ai vertici degli elementi vitrei, in nodi in acciaio, come illustrato in Fig. 1.

I pannelli sono composti da due strati di 5 mm temperati chimicamente<sup>[6]</sup> e laminati mediante strato di Pvb da 1,52 mm.

I nodi metallici (Fig. 2) presentano degli alloggiamenti circolari che accolgono, per il tramite di 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.

Sotto ponendo 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 pressio-

ni e interrompere per distacco la trasmissione di trazioni nocive al vetro.

Dal punto di vista della industrializzazione della costruzione, si osserva che i nodi metallici 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", Fig. 3).

Una volta collocata in opera, se alla trave TVT vengono applicati carichi crescenti in corrispondenza dei nodi superiori, giunti a un certo livello di carico esterno si verificherà la decompressione dei pannelli di vetro al lembo inferiore della trave (Fase "1": decompressione).

Contemporaneamente, l'assorbimento delle trazioni viene interamente trasferito ai tiranti

metallici. Lo schema statico subisce, pertanto, una modifica rappresentata schematicamente in Fig. 4.

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, snerbandandosi, 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 TVT $\alpha$ e TVT $\beta$

Sono stati finora allestiti due prototipi di questa linea di travi. Il primo, denominato TVT $\alpha$ , 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 (Fig. 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 (Fig. 5).

Il secondo prototipo, TVT $\beta$ , 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 TVT $\alpha$ , anche se gli spessori, il tipo di tempera e il tipo di interlayer 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 (vedi Figura 6) e per facilitare le operazioni di montaggio le barre sono state sostituite da cavetti spirodali in acciaio inox muniti di tenditori (Fig. 7).

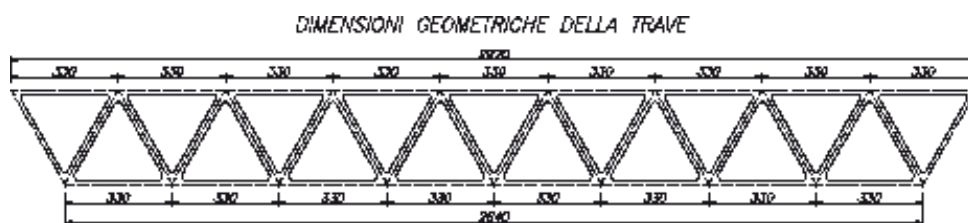


Fig. 5 - Schema del prototipo TVT $\alpha$ .

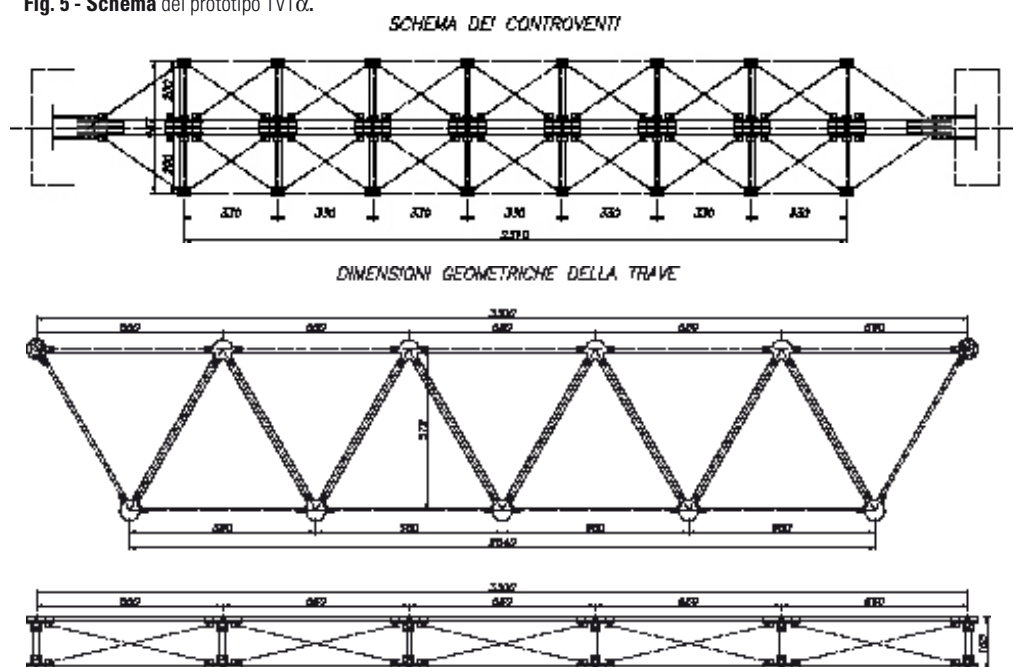


Fig. 6 - Schema del prototipo TVT $\beta$ .



Fig. 7 - Prototipo TVT $\beta$ .

### Modellazione numerica

Il comportamento strutturale dei prototipi TVT $\alpha$  e TVT $\beta$  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 $\alpha$  ha permesso di confermare il comportamento ipotizzato in fase di ideazione e di individuazione dei vari stati limite della struttura. In Fig. 8 è rappresentata la mappatura delle tensioni

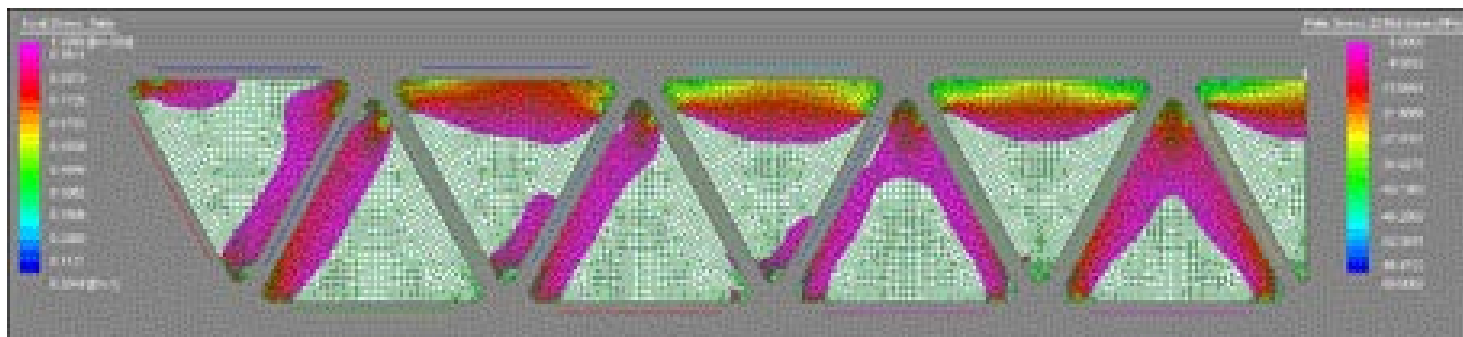


Fig. 8 - Tensioni principali di compressione ( $\sigma_{max} = -58 \text{ MPa}$ ).

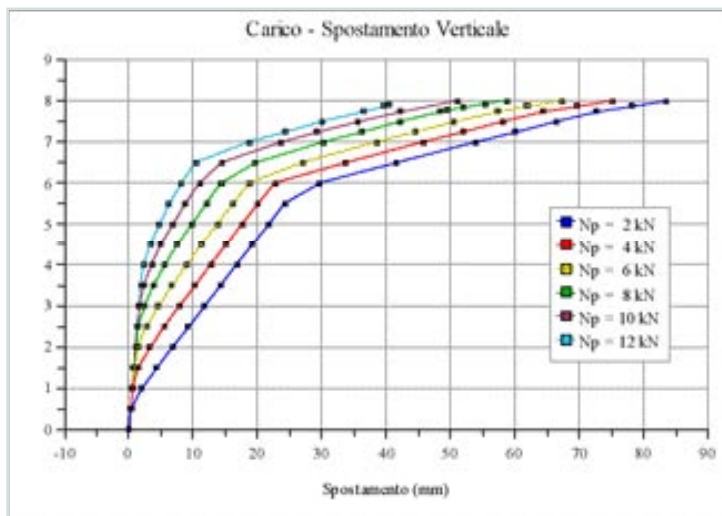


Fig. 9 - Andamento dello spostamento in funzione del carico applicato per diversi valori di pretesione dei cavi.



Fig. 10 - Prototipo TVT $\alpha$  in fase di sperimentazione.

principali di compressione sul vetro in corrispondenza dello snervamento della barra inferiore e sono evidenziate le compressioni trasmesse dal vetro e le trazioni assorbite dalle barre metalliche.

L'analisi FEM, eseguita sulla trave TVT $\beta$ , ha consentito di approfondire l'effetto della pretesione dei cavi sulla rigidità della trave. Inoltre, sono state effettuate delle analisi di stabilità a svergolamento per valutare la rigidità torsionale di questo secondo prototipo. In Fig. 9 è rappresentato, a titolo d'esempio, l'andamento degli spostamenti verticali in mezzeria in funzione della preten-

sione 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 $\alpha$  (Fig. 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 $\beta$  è, allo stato attuale, completamente allestito e sono in 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.

### Riferimenti bibliografici

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

### 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 e i laureandi che hanno offerto la loro collaborazione, con particolare riferimento al laureando Stefano Serracchiani.