



Fig. 1



Fig. 2

7 LE TRAVI IBRIDE IN VETRO PRECOMPRESSO TVT

Strutture in vetro: dalle visioni dell'architettura alle realizzazioni dell'ingegneria

L'intrinseca trasparenza del vetro, i giochi di riflessi e di rifrazioni ma anche la sua durezza e la resistenza chimica agli attacchi degli agenti climatici hanno decretato da sempre il successo di questo materiale negli impieghi in campo architettonico sia pur tradizionalmente limitati alla realizzazione di elementi secondari quali finestrate, tamponamenti e pareti divisorie. Architetti visionari come Mies van der Rohe e Bruno Taut hanno predetto con largo anticipo l'ingresso trionfale del vetro in architettura ma è solo in epoche relativamente recenti che ha trovato impiego anche per la realizzazione di strutture portanti principali quali facciate continue, orizzontamenti, nervature, colonne, sotto la spinta esercitata da numerosi importanti architetti verso il raggiungimento di una completa smaterializzazione delle strutture portanti [M.Froli: *Il vetro: ricerca dell'evanescenza*, Architetture Pisane, n°19, pgg. 7-11, 2010]. La caratteristica di fragilità aleatoria che affligge questo materiale, e dunque l'apparente impossibilità di prevederne il comportamento a rottura, rendono però tecnicamente ed economicamente arduo ingegnerizzare strutture in vetro,

tra le quali le travi, senza limitare troppo le libertà formali richieste dagli architetti. Ed è ancora a causa della sua fragilità che tecnici e committenti continuano a nutrire un atteggiamento di diffidenza per un impiego del vetro in opere strutturalmente impegnative, come appunto le travi, specie se di luce considerevole. Tuttavia questo traguardo ambizioso è stato raggiunto grazie alle maggiori conoscenze teorico-sperimentali sviluppate attorno al comportamento meccanico di questo affascinante materiale, all'ampliamento dei margini di prestazioni statiche sotto Stati Limite di Esercizio ottenibili mediante adeguate tecniche di presollecitazione, nonché all'amplificazione delle riserve di sicurezza nei confronti degli Stati Limite Ultimi ottenibili grazie alla scelta di un sistema costruttivo e di uno schema statico che rispettino i due principi fondamentali di ridondanza e gerarchia delle resistenze caratterizzanti il Fail Safe Design (FSD).

Il principio di ridondanza impone che componenti strutturali tra loro eguali siano disposte in parallelo semplice (almeno due componenti) o multiplo in modo che nella eventualità di collasso parziale o completo di una componente le altre siano in grado di sostenere il carico con un inferiore ma ancora

accettabile margine di sicurezza come illustrato in sintesi nel seguito. Il principio di gerarchia prescrive che a livello di ciascuna componente strutturale le risorse resistenti dei vari elementi siano graduate in modo che la successione delle crisi segua un preciso e prestabilito ordine. Nel caso di strutture ibride vetro-acciaio si cercherà, per esempio, che la crisi per snervamento delle parti in acciaio preceda quella per compressione delle parti in vetro.

Travi stratificate ibride a parete discontinua e armatura attiva: le Travi Vitree Tensegrity

L'obiettivo di raggiungere luci considerevoli con travi di vetro può essere raggiunto se la trave viene segmentata in tanti pannelli di vetro dotati di dimensioni relativamente contenute e conveniente geometria modulare e se si affida integralmente alla presollecitazione la interconnessione reciproca tra i vari pannelli [M. Froli, G. Masiello: *Giunzioni ed incollaggi. Design strutturale ai limiti delle possibilità tecniche*, Architetture Pisane, n°19, pgg. 14-15, 2010]. La genesi e il funzionamento delle Travi Vitree Tensegrity (TVT), ideate da Maurizio Froli e da lui brevettate per l'Università di Pisa, si basa sui due precedenti con-

cetti di presollecitazione e modularizzazione. La frammentazione manifestata dalle travi in vetro a parete continua quando raggiungono il collasso è stata anticipata nelle TVT e pilotata verso una suddivisione regolare in pannelli triangolari equilateri tra loro identici disposti secondo uno schema Warren. Ciascun pannello è libero da fori e ottenuto per laminazione di due lastre di vetro HSG con interposto strato di PVB. I vertici dei pannelli sono arrotondati e vincolati per semplice contatto monolaterale in alloggiamenti circolari presenti nei nodi di acciaio di interconnessione. Il contatto diretto tra vetro e acciaio che potrebbe suscitare pericolose concentrazioni di pressione è evitato grazie ad una sottile lamina di idoneo materiale deformabile. La precompressione viene attuata per mezzo di un sistema di barre o cavi in acciaio che confluiscono, insieme ai vertici degli elementi in vetro, in nodi di acciaio opportunamente sagomati. A livello complessivo le TVT si compongono di due ordini paralleli e verticali di pannelli triangolari in vetro opportunamente distanziati tra loro. L'unione tra i due ordini paralleli è ottenuta mediante profili tubolari di acciaio avvitati al centro dei nodi. Al lembo superiore compresso è disposta una struttura orizzontale controventante, anch'essa composta da pannelli vitrei. Il comportamento meccanico sotto carico di una trave TVT si esplica essenzialmente in tre fasi legate all'ordine di applicazione dei carichi e alla loro intensità. Facendo riferimento allo schema statico di trave semplicemente appoggiata con carico di esercizio verticale applicato ai nodi superiori si manifestano successivamente le seguenti fasi:

→ Fase "O" o della presollecitazione

All'atto della tesatura, la trazione nel sistema dei tiranti spinge i vertici dei pannelli in vetro contro i nodi d'acciaio i quali reagiscono con forze risultanti, dirette all'incirca secondo le bisettrici dei pannelli, che generano nel vetro uno stato di compressione. La prevalenza della trazione dei cavi inferiori su quella degli altri tiranti produce nella trave uno stato di pressoflessione e una controfreccia.

→ Fase "1" o dell'esercizio

In questa fase la trave viene posizionata sugli appoggi. Oltre al proprio peso essa viene sottoposta anche al carico esterno di esercizio. Le azioni esterne, applicate alla trave in corrispondenza dei nodi superiori, generano un momento flettente positivo e quindi inducono una progressiva decompressione del

vetro al lembo inferiore della trave e un aumento degli sforzi di compressione al lembo superiore. Raggiunta la decompressione del vetro al lembo inferiore lo sforzo di trazione viene assorbito e trasmesso esclusivamente dalle barre longitudinali inferiori mentre il vetro risulta pressoché esente da trazioni, fatta eccezione per modesti sforzi secondari dovuti a fenomeni di diffusione delle isostatiche di compressione. A partire dalla decompressione lo schema statico della trave si evolve avvicinandosi moltissimo al comportamento reticolare di una travatura Warren formata da aste con nodi-cerniera.

→ Fase "2" o del collasso

Questa fase inizia ad avere luogo quando qualche componente di acciaio raggiunge la tensione limite di snervamento o quando qualche componente in vetro si instabilizza o inizia a fessurarsi e termina con il collasso completo della trave. Nelle travi TVT le barre metalliche longitudinali inferiori tese sono dimensionate in modo tale che il loro snervamento preceda la instabilità del vetro compresso al lembo superiore della trave. In tal modo è rispettato il principio di gerarchia del FSD e la rottura della trave è di tipo duttile e si evita la rottura fragile così temuta in una trave di vetro. Particolare attenzione in fase di sviluppo e progettazione delle travi TVT è stata rivolta alla standardizzazione degli elementi che la compongono. I pannelli in vetro costituenti i piani verticali, tutti di forma triangolare equilatera e di uguali dimensioni, permettono di diminuire i tempi di produzione, di ridurre gli sfridi e di facilitare le operazioni di assemblaggio della trave. Un ulteriore vantaggio conseguente l'impiego di pannelli triangolari equilateri è la presenza di sole tre tipologie distinte di nodi metallici che risultano invarianti rispetto ad un'ampia variazione della altezza costruttiva della trave a causa della invarianza angolare dei vertici dei pannelli. Inoltre, grazie alla loro natura segmentale, le travi TVT presentano l'enorme vantaggio economico ed eco sostenibile di evitare l'intera rimozione della trave nel caso di rottura accidentale anche di una sola lastra, come avviene nelle travi tradizionali stratificate a parete continua, ma solo la sostituzione del pannello danneggiato. Questa tipologia di travi risulta dunque ispirata alla modularità, all'ottimizzazione di impiego dei materiali e alla standardizzazione, presentando al contempo un elevatissimo grado di trasparenza e soddisfacendo i requisiti di gerarchia e ridondanza strutturale del FSD.



Fig. 3



Fig. 4



Fig. 5

Fig. 1 - Trave in opera sugli appoggi
 Fig. 2 - Elementi metallici di connessione reciproca tra pannello rettangolare e pannelli triangolari
 Fig. 3 - Nodo di estremità inferiore assemblato
 Fig. 4 - Nodo di estremità superiore assemblato
 Fig. 5 - Nodo intermedio assemblato

- Fig. 6 - Applicazione della presollecitazione alle barre inferiori mediante martinetto idraulico
 Fig. 7 - Dettaglio dei nodi superiori e del loro collegamento reciproco
 Fig. 8 - Fase di assemblaggio del secondo piano vetrato verticale
 Fig. 9 - Sollevamento della trave



Fig. 6

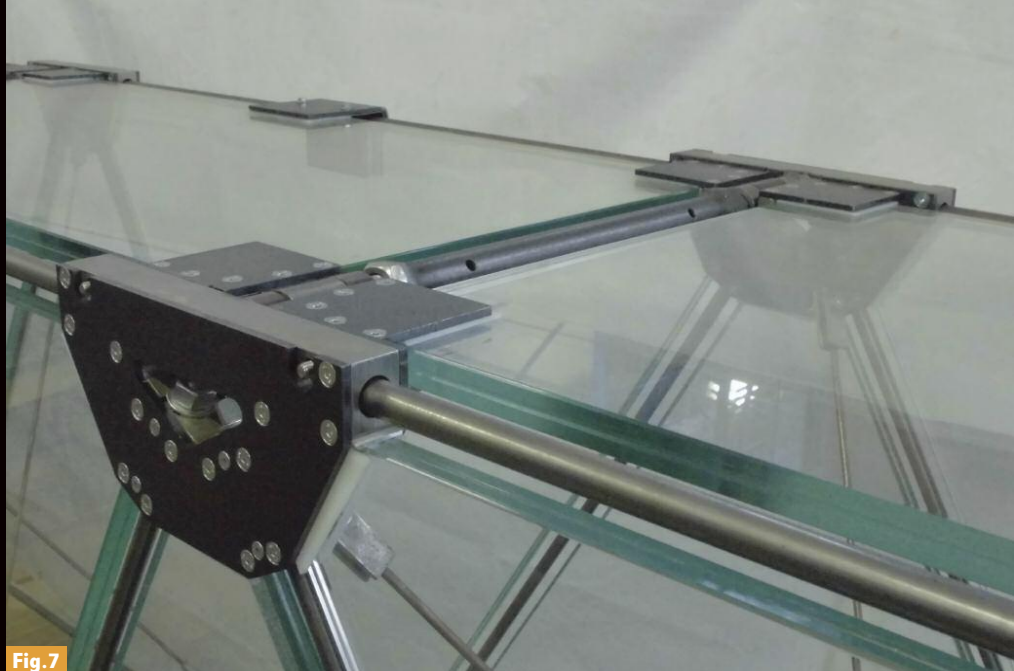


Fig. 7

I prototipi TVT e TVT

Fino ad oggi sono stati sviluppati e realizzati successivamente tre prototipi appartenenti a questa linea di travi, denominati rispettivamente TVT α , TVT β , e TVT γ . Simulazioni numeriche e prove di laboratorio statiche, cicliche e dinamiche effettuate sui primi due prototipi TVT α ($L=2330$ mm), e TVT β ($L=3330$ mm) hanno confermato il comportamento meccanico previsto a livello intuitivo in fase di concepimento dell'idea inventiva, mettendo inoltre in luce anche capacità di dissipazione dell'energia attribuibili agli scorrimenti con attrito in corrispondenza dei nodi e agli scorrimenti viscosi nel materiale plastico di interstrato. In particolare il prototipo TVT β , pesante complessivamente solo 125 daN, ha raggiunto un carico di rottura pari a circa 40 volte il suo peso, ossia 5000 daN [M.Froli, L.Lani: *Strutture duttili in vetro: le Travi Vitree Tensegrity*, Rivista del Vetro, n°2, 2008; M. Froli, L.Lani: *Travi trasparenti*, Modulo, n°341, 2008; M.Froli, L.Lani: *Glass Tensegrity Trusses*, Structural Engineering International, N°4, 2010].

Il prototipo TVT e il traguardo dei 12 metri

I buoni risultati sperimentali esibiti dal prototipo TVT β e l'ottima corrispondenza tra previsioni FEM e sperimentazione hanno mostrato che con questa tecnologia la strada verso la realizzazione di travi in vetro capaci di raggiungere con adeguati margini di sicurezza strutturale valori importanti di luce libera era aperta. Il traguardo è stato raggiunto con la costruzione del terzo prototipo della serie, il TVT γ , il quale, con la sua luce libera tra gli appoggi di 12 metri rappresenta attual-

mente una delle travi di vetro più lunghe del mondo (v. Fig. 1).

La concezione costruttiva di questo modello non differisce da quella dei primi due prototipi e descritta in precedenza. La sezione trasversale ha in questo caso la forma di una C rovesciata nel quale ciascuna delle due anime verticali, tra loro distanti 600 mm, è formata da un piano vetrato composto da 19 pannelli triangolari equilateri in vetro laminato aventi lato di 1087 mm. In considerazione della luce circa 4 volte maggiore rispetto al modello TVT β e dunque delle maggiori richieste di prestazioni statiche, è stato necessario introdurre nel progetto le modifiche e i perfezionamenti di seguito illustrati.

Il piano orizzontale superiore della trave, che nel modello precedente era costituito da un traliccio reticolare in acciaio, nel TVT γ è stato realizzato mediante una successione di 10 pannelli rettangolari di vetro piano laminato di dimensioni 1126x524mm, incernierati cilindricamente agli estremi, i quali svolgono contemporaneamente la funzione di controvento orizzontale delle zone compresse dei pannelli verticali triangolari e quella di aumento della quota di sezione trasversale della trave resistente a compressione. Per aumentare ulteriormente la stabilità locale delle parti compresse, e quindi la capacità portante ultima dell'intera struttura, la lunghezza libera di inflessione dei pannelli rettangolari e del lato superiore dei pannelli triangolari è stata dimezzata vincolando tra loro i pannelli nei punti di mezzo dei bordi liberi mediante uno speciale ritegno metallico (v. Fig. 2).

Tutti i pannelli sono stratificati con 2 lastre di vetro indurito termicamente (HSG) aventi spessore di 10mm e interlayer polimerico

(PVB) di spessore 1.52mm. I vertici dei pannelli sono smussati con raggio pari a 28mm. Al fine di evitare nocive concentrazioni di pressioni di contatto ogni interfaccia vetro-acciaio è stata guarnita mediante idoneo materiale deformabile.

Altro elemento costruttivo nuovo della versione γ rispetto alla precedente versione β è l'introduzione di un sistema di irrigidimento trasversale a croci di sant'Andrea formato da barre d'acciaio preteso di diametro 6mm che fornisce alla trave una notevole rigidità torsionale aumentandone in esercizio la stabilità flesso-torsionale sotto carichi esterni e garantendone la indeformabilità trasversale nelle fasi di sollevamento, movimentazione e messa in opera. Nel modello γ i tiranti in acciaio sono stati realizzati in barre anziché mediante trefoli spiroidali. Le barre longitudinali hanno un diametro di 18mm, le barre diagonali di campata hanno diametro di 14mm mentre quelle di estremità hanno diametro di 16mm. Anche i nodi di acciaio e il sistema di tesatura hanno subito una notevole evoluzione nel passaggio dal modello β al modello γ a causa del maggiore impegno statico (v. Fig. 3, v. Fig. 4, v. Fig. 5).

La tesatura delle barre diagonali e di quelle longitudinali superiori, che nel modello β avveniva per mezzo di tenditori, nel prototipo γ viene attuata mediante avvitatura di dadi esagonali posti alle estremità filettate delle barre e serraggio con chiave dinamometrica.

I dadi trovano alloggio, nel caso delle diagonali, in apposite cavità ricavate nel corpo stesso dei nodi (v. Fig. 6).

Alle estremità superiori i nodi sono muniti di selle di appoggio mentre alle estremità inferiori essi sono stati conformati in modo da of-



Fig. 8

→ Modello TVT γ -2a

Modello tridimensionale di metà trave che permette di determinare il comportamento sotto carico in assenza di imperfezioni geometriche locali dei pannelli ma in presenza di un'imperfezione geometrica globale della trave (40mm).

→ Modello TVT γ -2b

Modello tridimensionale di metà trave, che permette di determinare il comportamento sotto carico in presenza di imperfezioni geometriche locali dei pannelli (4mm) e in presenza di un'imperfezione geometrica globale della trave (40mm).

I modelli numerici globali denominati Modello TVT γ -1a e Modello TVT γ -1b si compongono di 31261 elementi bidimensionali di tipo *plate/shell* a 3 e a 4 nodi, 1198 elementi unidimensionali di tipo *beam* alcuni con comportamento non lineare e 15503 elementi di tipo *link*.

I modelli numerici globali denominati Modello TVT γ -2a e Modello TVT γ -2b si compongono di 62522 elementi bidimensionali di tipo *plate/shell* a 3 ed a 4 nodi, 2395 elementi unidimensionali di tipo *beam* alcuni con comportamento non lineare, e 30821 elementi di tipo *link* (v. Fig. 8).

In seguito al posizionamento della trave sugli appoggi questa è stata sottoposta a monitoraggio costante al fine di valutare gli effetti delle condizioni ambientali di temperatura e umidità sul livello di presollecitazione a causa del comportamento visco-elastico del materiale polimerico di interstrato e di interposizione (v. Fig. 9, v. Fig. 10). In un secondo momento si è proceduto alla caratterizzazione dinamica del prototipo e successivamente all'esecuzione di prove di carico di tipo statico spinte fino a collasso. I risultati delle prove sono in questo momento in fase di elaborazione e si sta procedendo inoltre ad un confronto con i risultati previsti dal modello precedentemente realizzato. Il prototipo TVT γ ha un peso complessivo di 18kN.

Maurizio Froli. Associato di Tecnica delle Costruzioni, DESTeC - Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, Sezione di Strutture, Università di Pisa.

Vincenzo Mamone. Dottorando, DESTeC Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, Sezione di Strutture, Università di Pisa.

fire adeguato contrasto al sistema di presollecitazione. Infine, la novità di maggiore rilievo che differenzia nettamente la versione γ dal prototipo β risiede nella sensibilmente maggiore entità della pretensione delle barre longitudinali inferiori che ha raggiunto il valore 30 KN per ciascuna di esse ed è stata attuata per mezzo di un martinetto idraulico (v. Fig. 7). L'analisi del comportamento meccanico e le verifiche di resistenza e stabilità della trave e dei suoi componenti sono state effettuate mediante modellazione numerica agli Elementi Finiti (FEM). Sono stati realizzati modelli numerici globali e locali e analisi numeriche non lineari considerando sia le non linearità geometriche e dei vincoli che le possibili imperfezioni geometriche iniziali.

I modelli numerici locali sono stati realizzati allo scopo di studiare il comportamento dei pannelli in vetro e la loro capacità portante al variare dello spessore delle lastre costituenti il pannello ovvero al fine di dimensionare lo spessore delle lastre. Inoltre con tali modelli si è cercato di valutare l'influenza delle caratteristiche meccaniche del materiale di interposizione in PVB sulla capacità portante dei

pannelli perché le caratteristiche meccaniche del PVB decadono all'aumentare della temperatura e della durata di applicazione del carico essendo il PVB un materiale visco-elastico. Su questi modelli sono state effettuate analisi elastiche, analisi di buckling e analisi non lineari, in quest'ultimo caso sia in assenza che in presenza di una imperfezione iniziale posta pari a 1/300 della lunghezza del pannello. Sono stati realizzati 4 diversi modelli numerici globali:

→ Modello TVT γ -1a

Modello tridimensionale di un quarto di trave che permette di determinare il comportamento sotto carico in assenza di imperfezioni geometriche sia locali (dei pannelli) che globali (della trave).

→ Modello TVT γ -1b

Modello tridimensionale di un quarto di trave che permette di determinare il comportamento sotto carico in presenza di imperfezioni geometriche locali dei pannelli (4mm) e in assenza di imperfezioni geometriche globali della trave.



Fig. 8