

Le travi TVT in vetro armato precompresso vincono la sfida delle grandi luci

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

Prof. Ing. Maurizio Froli (*)

Dott. Ing. Vincenzo Mamone ()**

(*) Associato di Tecnica delle Costruzioni, DESTeC - Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, Sezione di Strutture, Università di Pisa

(**) Dottorando, DESTeC - Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, Sezione di Strutture, Università di Pisa



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 il vetro 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 ideale, completa smaterializzazione delle strutture portanti [1].

La caratteristica di fragilità aleatoria che affligge questo materiale, e dunque l'apparente impossibilità di prevederne il comportamento a rottura, rende 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 oggi raggiunto grazie alle maggiori conoscenze teorico-sperimentali sviluppate attorno al comportamento meccanico di questo affascinante materiale [2], 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



Figura 1_ Trave in opera sugli appoggi

Figura 2_ Elementi metallici di connessione reciproca tra pannello rettangolare e pannelli triangolari

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

Concezione strutturale e comportamento meccanico

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 l'interconnessione reciproca tra i vari pannelli [3].

La genesi ed il funzionamento delle Travi Vitree Tensegrity (TVT), ideate da Maurizio Froli e da lui brevettate per l'Università di Pisa, si basano sui due precedenti concetti di presollecitazione e modularizzazione come nel seguito illustrato.

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 ed 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 "0" 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 ed una controfrecchia;

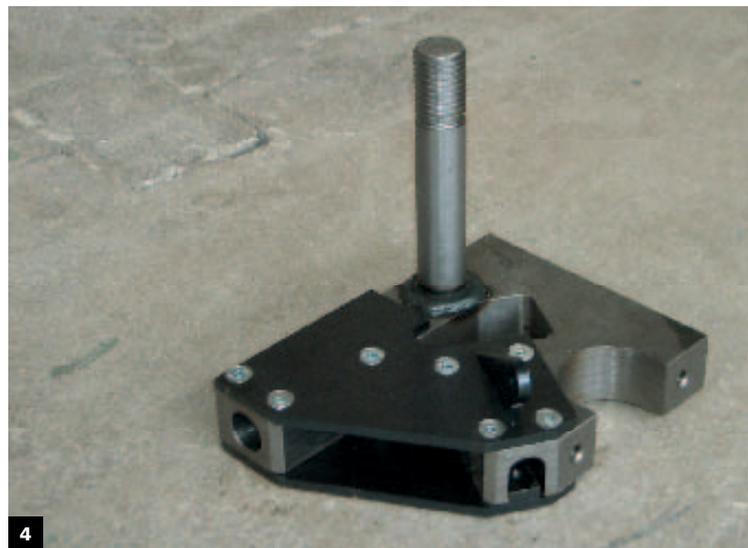
- fase "1" o dell'esercizio.

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 ed 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



Figura 3_Nudo di estremità inferiore assemblato

Figura 4_Nudo di estremità superiore assemblato



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 l'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 dell'altezza costruttiva della trave a causa dell'invarianza angolare dei vertici dei pannelli (sempre di 60°). Inoltre, grazie alla loro natura segmentale, le travi TVT presentano l'enorme vantaggio economico ed ecosostenibile 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 ed alla standardizzazione, presentando al contempo un elevatissimo grado di trasparenza e soddisfacendo i requisiti di gerarchia e ridondanza strutturale del FSD.

I prototipi TVT α e TVT β

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 = 2970 mm) e TVT β (L = 3300 mm) hanno confermato il comportamento meccanico previsto a livello intuitivo in fase di concepimento della idea inventiva, mettendo inoltre in luce anche la capacità di dissipazione dell'energia attribuibile 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 [4], [5], [6].

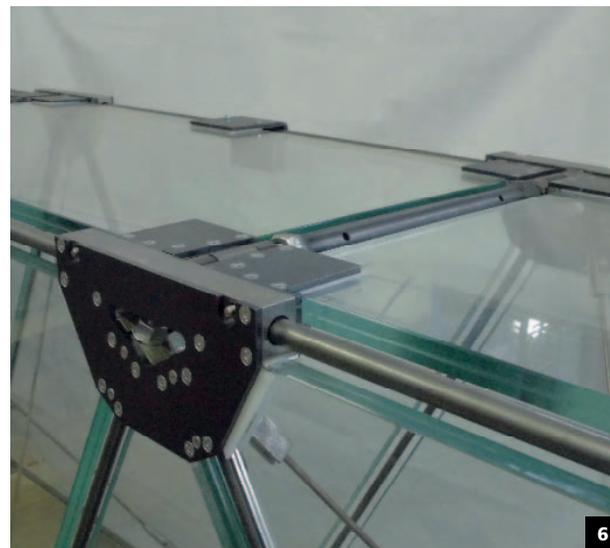
Il prototipo TVT γ ed il traguardo dei 12 metri

I buoni risultati sperimentali esibiti dal prototipo TVT β e la 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



Figura 5_Nodo intermedio assemblato

Figura 6_Dettaglio dei nodi superiori e del loro collegamento reciproco



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 attualmente una delle travi di vetro più lunghe del mondo (Figura 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 un C rovesciato 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 ed 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 1126x524 mm, 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 (Figura 2).

Tutti i pannelli sono stratificati con 2 lastre di vetro indurito termicamente (HSG) aventi spessore di 10 mm e interlayer polimerico (PVB) di spessore 1.52 mm. I vertici dei pannelli sono smussati con raggio pari a 28 mm.

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 6 mm che fornisce alla trave una notevole rigidità torsionale, aumentandone in esercizio la stabilità flessotorsionale sotto carichi esterni e garantendone l'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 spirroidali. Le barre longitudinali hanno un diametro di 18 mm, le barre diagonali di campata hanno diametro di 14 mm mentre quelle di estremità hanno diametro di 16 mm. Anche i nodi di acciaio ed il sistema di tesatura hanno subito una notevole evoluzione nel passaggio dal modello β al modello γ a causa del maggiore impegno statico (Figura 3, Figura 4, Figura 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 (Figura 6).

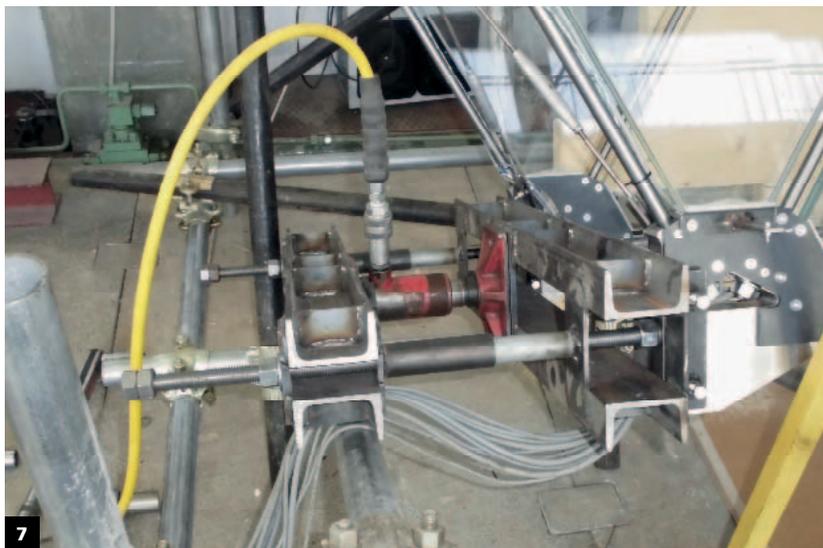
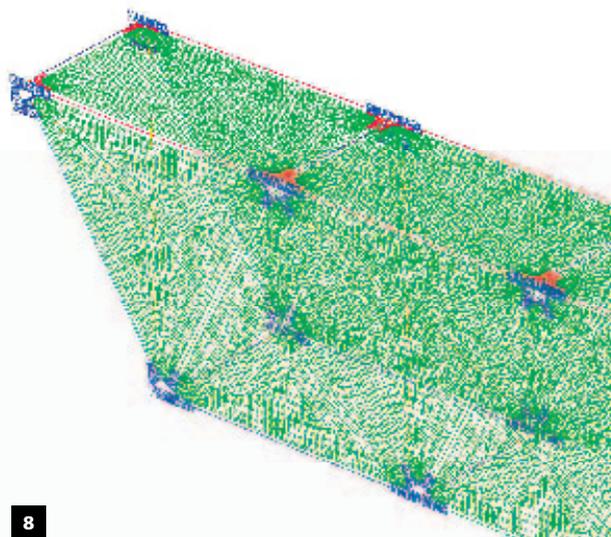


Figura 7_
Applicazione della
presollecitazione
alle barre inferiori
mediante martinetto
idraulico

Figura 8_ Modello
agli elementi finiti

Alle estremità superiori i nodi sono muniti di selle di appoggio, mentre alle estremità inferiori essi sono stati conformati in modo da offrire 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 (Figura 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 ed 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 (4 mm) ed in assenza di imperfezioni geometriche globali della trave;
- **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 (40 mm);
- **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 (4 mm) ed in presenza di un'imperfezione geometrica globale della trave (40 mm).

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 ed a 4 nodi, 1198 elementi unidimensionali di tipo *beam* alcuni con comportamento non lineare, e 15503 elementi di tipo *link* (Figura 8).

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*.



Figura 9_ Fase di assemblaggio del secondo piano vetrato verticale

Figura 10_ Sollevamento della trave



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 ed umidità sul livello di presollecitazione a causa del comportamento visco-elastico del materiale polimerico di interstrato e di interposizione (Figura 9, Figura 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 agli elementi finiti precedentemente realizzato. Il prototipo TVTy ha un peso complessivo di 18 kN.

Prove sperimentali

Successivamente al posizionamento della trave TVT sugli appoggi si è proceduto alla sua caratterizzazione dinamica ed all'esecuzione di prove di carico di tipo statico spinte fino a collasso. La caratterizzazione dinamica ha permesso di definire i reali modi di vibrare e le capacità di smorzamento, mentre la successiva prova statica a flessione su quattro punti spinta fino a collasso ha permesso di saggiarne il comportamento statico sia in esercizio che allo stato limite ultimo. I risultati delle prove sono stati confrontati con i risultati previsti dal modello agli elementi finiti precedentemente realizzato, consentendone un successivo affinamento.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti ed una sintetica descrizione delle prove.

Caratterizzazione dinamica

La caratterizzazione dinamica di una struttura consiste nella determinazione delle sue proprietà dinamiche ottenute mediante l'acquisizione, l'elaborazione e la valutazione della risposta della stessa ad eccitazioni naturali o forzate. La risposta della struttura può essere ottenuta in termini di accelerazioni, velocità o spostamenti. L'induzione delle vibrazioni sulle strutture di cui si vuole effettuare la caratterizzazione dinamica può essere realizzata in modi differenti:

- vibrazioni generate da forzanti dinamiche sinusoidali unidirezionali caratterizzate da un determinato contenuto in frequenza, ad esempio mediante vibrodina;
- rumore ambientale, ovvero vibrazioni ambientali quali vento o microsismi, o attività antropiche quali traffico veicolare, folla;
- vibrazioni libere, provocate da un'azione impulsiva applicata alla struttura, generate mediante il rilascio istantaneo della struttura dopo averla sottoposta a una deformazione iniziale, oppure con impulsi trasmessi da un martello o dalla caduta di gravi.

Le acquisizioni sono state fatte impiegando 16 accelerometri posizionati sui nodi metallici, in modo tale da acquisire le componenti delle accelerazioni nodali sia verticali che orizzontali ortogonali all'asse della trave.

La trave si compone di 42 nodi metallici ed essendo il numero degli accelerometri 16, quindi insufficiente a definire i modi di vibrare della trave mediante una sola disposizione degli accelerometri, si è reso necessario ripetere ogni acquisizione spostando gli accelerometri in 3 diverse configurazioni.

TABELLA 1 FORME MODALI E FREQUENZE PROPRIE

| FORMA MODALE [N] | CARATTERIZZAZIONE DINAMICA | |
|------------------|----------------------------|----------------------------|
| | FREQUENZA [HZ] | MODELLO FEM FREQUENZA [HZ] |
| 1 | 3.86 | 3.63 |
| 2 | 10.92 | 10.96 |
| 3 | 11.53 | 11.44 |
| 4 | 15.64 | 13.93 |
| 5 | 18.08 | 19.11 |
| 6 | 22.08 | 23.95 |
| 7 | 26.26 | 26.48 |

TABELLA 2 PRESOLLECITAZIONE DEL SISTEMA DI TIRANTI

| ELEMENTO | DIAMETRO [MM] | SISTEMA DI PRESOLLECITAZIONE | TIRO APPLICATO [KN] |
|-------------------------------|---------------|------------------------------|---------------------|
| Barre longitudinali superiori | 18 | Chiave dinamometrica | 15 |
| Barre diagonali di estremità | 16 | Chiave dinamometrica | 20 |
| Barre diagonali intermedie | 14 | Chiave dinamometrica | 15 |
| Barre longitudinali inferiori | 18 | Martinetto idraulico | 30 |

Le acquisizioni sono state effettuate spostando gli accelerometri nelle tre configurazioni e registrando le vibrazioni indotte da rumori ambientali sia in assenza che in presenza di masse aggiunte di entità nota e posizionate in corrispondenza di alcuni punti sulla trave. L'aggiunta delle masse provoca una variazione della massa sismica della struttura e di conseguenza una variazione delle frequenze proprie e delle forme modali rispetto a quelle della struttura priva di masse aggiunte; tale ulteriore acquisizione ha lo scopo di fornire una maggiore quantità di dati sperimentali, al fine di permettere un più preciso affinamento del modello numerico agli Elementi Finiti. Infine si è proceduto all'acquisizione delle vibrazioni libere della trave provocate da azioni impulsive trasmesse dal martello strumentato; le azioni impulsive sono state applicate in alcuni nodi della trave e ripetute più volte: anche in questo caso, ogni acquisizione è stata ripetuta spostando gli accelerometri nelle 3 diverse configurazioni precedentemente definite. La caratterizzazione dinamica del prototipo ha portato alla determinazione sperimentale delle forme modali e delle frequenze modali reali, che sono state confrontate con le analoghe forme modali ricavate dal modello numerico agli Elementi Finiti; i risultati sono riportati in Tabella 1.

La corrispondenza delle forme modali si riscontra sia in termini di frequenze che in termini di deformate modali, cioè anche nella corrispondenza tra la matrice degli spostamenti

nodali normalizzata dei modi di vibrare ricavata dalla caratterizzazione dinamica con l'analogica matrice ricavata dall'analisi modale effettuata con il codice di calcolo.

L'analisi dinamica modale effettuata con il codice di calcolo è lineare, e pertanto il modello numerico è privo di non linearità (dei vincoli, dei materiali), che invece sono rese necessarie per valutare il comportamento statico della trave. A questa fase seguirà quella di controllo e l'eventuale ulteriore calibrazione del modello numerico, affinché descriva fedelmente la risposta della struttura anche in presenza delle masse aggiunte e la risposta ad azioni di tipo impulsivo.

Prove statiche di carico spinte fino a collasso

La trave è stata sottoposta a due prove di carico a flessione su quattro punti con schema statico di semplice appoggio. Il carico di prova, sviluppato mediante due martinetti idraulici gemelli azionati con pompa manuale, è trasmesso alla trave in corrispondenza di due coppie di nodi superiori distanti ciascuno 4800 mm dall'appoggio più vicino, in modo da trasferire ai quattro nodi le stesse forze (Figura 11).

Durante le prove di carico sono stati misurati, mediante 7 trasduttori induttivi di spostamento, gli abbassamenti dei 4 nodi inferiori di mezzera, di 2 nodi inferiori posti a 2400 mm dal nodo inferiore di estremità e lo spostamento orizzontale dell'appoggio mobile della trave. Per misurare le deformazioni specifiche e le tensioni degli elementi in vetro e dei tiranti in acciaio sono stati posizionati sulla trave 14 estensimetri.

I 6 induttivi per la misurazione degli abbassamenti della trave e gli estensimetri posizionati sui pannelli in vetro e quelli posizionati sulle barre diagonali Ø 16 e sulle barre longitudinali superiori ed inferiori sono disposti simmetricamente rispetto al piano di simmetria longitudinale della trave.

Gli estensimetri sono stati posizionati prima delle operazioni di tesatura della trave e del suo posizionamento sugli appoggi. Entrambe le barre longitudinali inferiori sono state presollecitate contemporaneamente mediante un tiro di 30 kN ciascuna mediante un martinetto idraulico azionato manualmente con pompa idraulica. Le prove statiche di carico hanno consentito di valutare il comportamento della trave in esercizio per carichi di modesta intensità e, successivamente, di misurare il carico di rottura del prototipo osservandone il comportamento in corrispondenza del collasso. Le previsioni fornite dal modello numerico agli Elementi Finiti indicavano un carico di collasso totale di valore superiore a 130 kN. Per questo motivo, nella storia di carico sperimentale sono stati previsti nell'ordine 3 cicli di carico-scarico con carico totale di prova di 30 kN, 3 cicli di carico-scarico con carico totale



Figura 11 Sistema e punti di applicazione del carico

Figura 12 Programma Carico-Tempo



di prova di 60 kN, 3 cicli di carico-scarico con carico totale di prova di 90 kN, ed infine incremento del carico fino alla crisi. In corrispondenza di ogni ciclo il carico massimo è stato mantenuto costante per un intervallo di 15 minuti, dopo i quali la trave è stata scaricata rapidamente e mantenuta scarica per un intervallo di 5 minuti prima della successiva fase di carico (Figura 12). Le fasi a carico/scarico costante sono state introdotte per osservare l'eventuale presenza di fenomeni visco-elastici e la capacità di recupero elastico del prototipo. Durante la prova sono stati rilevati e registrati in tempo reale sia le deformazioni degli estensimetri che gli spostamenti degli induttivi e correlati istantaneamente con il carico di prova totale applicato alla trave. È stato quindi possibile dedurre le correlazioni carico-deformazione, tempo-deformazione, carico-spostamento, tempo-spostamento.

Prova di carico N° 1

Durante la fase di incremento del carico del settimo ciclo, raggiunto il livello di carico totale di 86,9 kN uno dei due correnti inferiori, ancora in campo elastico, si è rotto fragilmente in corrispondenza della sezione netta della filettatura di un giunto con manicotto.

La rottura imprevista ed improvvisa di una delle due barre di armatura inferiore non ha però provocato alcuna fessurazione negli elementi di vetro né lo snervamento o la perdita di posizione di altri elementi in acciaio.

Viceversa, la trave ha conservato assetto e configurazione manifestando esclusivamente una leggera torsione dovuta al maggiore abbassamento della parete vetrata posta dal

lato del corrente che si è rotto. Questa rottura accidentale ha consentito così di mettere pienamente in luce le riserve di capacità portante post critica conferite alla trave dalla presenza della doppia parete.

Prova di carico N° 2

La crisi locale della sezione ridotta in corrispondenza della filettatura con la barra ancora in campo elastico, l'integrità di tutto il resto e la particolare conformazione dei nodi hanno permesso di riparare e rafforzare con facilità il prototipo. La barra danneggiata è stata sfilata e si è realizzata una nuova filettatura. Inoltre, si è provveduto a rinforzare tutte le giunzioni saldando i manicotti alle rispettive barre ottenendo così il ripristino delle sezioni resistenti anche nelle zone di giunzione. Una volta ultimate le operazioni di riparazione e rinforzo, sono stati applicati sulle barre inferiori 4 ulteriori estensimetri ed effettuata nuovamente la loro presollecitazione mediante martinetto idraulico come precedentemente descritto, applicando anche in questo caso ad ogni corrente inferiore un tiro di 30 kN. Completata la ritesatura del prototipo è stata effettuata nuovamente la prova di carico ripetendo la stessa storia di carico impiegata nella prova N° 1 con 3 cicli di carico e scarico a 30 kN, 60 kN e 90 kN.

Completati i 9 cicli, la trave è stata scaricata ed infine applicato un carico progressivamente crescente fino a portarla a rottura. In corrispondenza di un carico totale di prova di circa 110 kN si è manifestato l'inizio dello snervamento dei due correnti inferiori nella zona di mezzeria della trave, con abbassamenti dei 4 nodi inferiori di mezzeria compresi tra 90 e 100 mm.

13

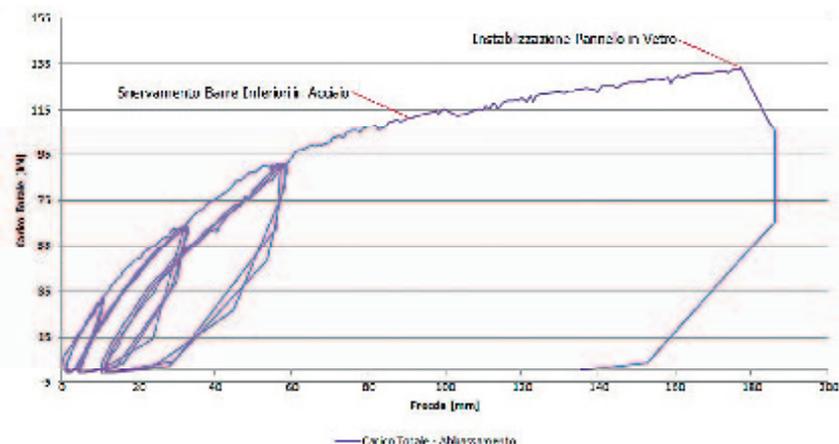


Figura 13_Carico Totale di Prova-Abbassamento massimo nodo inferiore

Figura 14_Particolare del pannello instabilizzato

Aumentando ulteriormente il carico, lo snervamento dei correnti inferiori si è manifestato anche nei campi contigui alla mezzeria.

Quando infine il carico di prova ha raggiunto il valore di 132 kN con un abbassamento dei 4 nodi inferiori di mezzeria compreso tra 178-168 mm e con i correnti inferiori ampiamente in campo plastico si è manifestata la rottura per instabilizzazione e collasso di un pannello triangolare, che però non è fuoriuscito dai suoi nodi di estremità (Figura 13, Figura 14).

14



Conclusioni

Le prove sperimentali eseguite sul prototipo TVT Gamma hanno messo in luce un comportamento perfettamente elastico della trave sotto cicli di carico e scarico nel dominio dei carichi di esercizio. All'aumentare progressivo del carico di prova lo snervamento delle barre longitudinali inferiori, accompagnato da elevati spostamenti verticali, ha preceduto la crisi per instabilizzazione di un pannello di vetro compresso dimostrando così che la trave esibisce a rottura un comportamento paradossalmente duttile pur essendo una struttura in vetro. Anche dopo l'instabilizzazione e la rottura di un pannello di vetro non si è verificato il distacco di questo dai suoi alloggi e la trave ha mantenuto, nonostante il grave danneggiamento, la sua configurazione mostrando la capacità di sostenere ancora carichi sia pure di livello inferiore. In definitiva, la sperimentazione ha dimostrato che è possibile realizzare in sicurezza travi di vetro di luce elevata. Inoltre, la possibilità che anche in travi di vetro di grande luce sia possibile raggiungere stati di collasso con elevati livelli di duttilità e sviluppo di risorse post critiche mediante l'applicazione dei principi di gerarchia delle resistenze e di ridondanza strutturale della progettazione Fail-Safe ha trovato, nella sperimentazione del prototipo TVT Gamma, piena validazione. ■

Ringraziamenti

La costruzione del prototipo TVT γ è stata cofinanziata dal MIUR nell'ambito del PRIN 2008 e sponsorizzata da Nuova Oxidal S.r.l, Rober Glass S.r.l, Sbrana Serramenti S.r.l, Vitarelli Vito S.p.A.

Riferimenti bibliografici

- [1] M. Froli: "Il vetro: ricerca dell'evanescenza", Architetture Pisane, n° 19, pagg. 7-11, 2010.
- [2] M. Froli, M. Santarsiero: "Un nuovo metodo teorico di verifica della resistenza di strutture in vetro", Rivista della Stazione Sperimentale del Vetro, N° 4, pagg. 13-25, 2010.
- [3] M. Froli, G. Masiello: "Giunzioni ed incollaggi. Design strutturale ai limiti delle possibilità tecniche", Architetture Pisane, n° 19, pagg. 14-15, 2010.
- [4] M. Froli, L. Lani: "Strutture duttili in vetro: le Travi Vitree Tensegrity", Rivista del Vetro, n° 2, 2008.
- [5] M. Froli, L. Lani: "Travi trasparenti", Modulo, n° 341, 2008.
- [6] M. Froli, L. Lani: "Glass Tensegrity Trusses", Structural Engineering International, N° 4, 2010.