

# PROGETTO DI UN PADIGLIONE INTEGRALMENTE VITREO

costruito mediante telai ibridi TVT di grande luce

## DESIGN OF A FULLY GLAZED PAVILION

built with long spanned hybrid TVT frames

Maurizio Froli, Dario Maesano, Francesco Laccone



La richiesta architettonica di una progressiva, completa smaterializzazione delle strutture portanti può essere soddisfatta solo entro certi limiti mediante l'impiego esclusivo di vetro strutturale. Quando a questa esigenza si aggiunge quella del superamento di grandi luci o grandi altezze è indispensabile ricorrere a sistemi costruttivi di tipo ibrido vetro-acciaio nei quali il vetro, fragile ma resistente a compressione, viene posto in associazione simbiotica con l'acciaio, duttile e resistente a trazione. Nella presente nota viene presentato lo studio di fattibilità di un padiglione integralmente vetrato costituito da una serie di telai trasversali ad alta trasparenza tamponati e controventati da pannelli vitrei ibridi precompressi. Le traverse dei portali, aventi circa 20 metri di luce, ed i piedritti, alti circa 8 metri, sono progettati mediante elementi del tipo TVT $\gamma$ -bis (Travi Vitree Tensegrity). La capacità della costruzione di sostenere in sicurezza elevate condizioni di carico statico e dinamico è dimostrata attraverso analisi numeriche multi-scala tarate sulla base dei risultati sperimentali raccolti nelle campagne di test effettuati sui prototipi TVT $\beta$  e TVT $\gamma$  e spinti fino a rottura.

*The architectural demand for a complete de-materialisation of load bearing structures can be satisfied only in limited cases with the exclusive structural use of glass. Otherwise, it is necessary to use hybrid glass-steel structures to achieve challenging applications as long spanned or high rise constructions. Hence, glass, fragile but highly compressive resistant, is associated with steel, ductile and tensile resistant. The present research presents the feasibility study for a fully glazed pavilion, made of six TVT $\gamma$ -bis (Travi Vitree Tensegrity) portal frames and hybrid pre-stressed panels as bracing system. The frames are about 20 m spanned and 8 m height. The structural performance to withstand heavy static and dynamic loads is assessed by means of multiscalar FEM numerical analyses, calibrated on the collapse tests performed on TVT $\beta$  e TVT $\gamma$  prototypes.*

Fig. 1 - Alcune realizzazioni contemporanee in vetro strutturale: (a) Apple cube, New York, USA [1]; (b) Stazione ferroviaria di Strasburgo, Francia [2]; (c) Centrale trigenerativa Diamante, Parco del Pratolino (FI) [3]

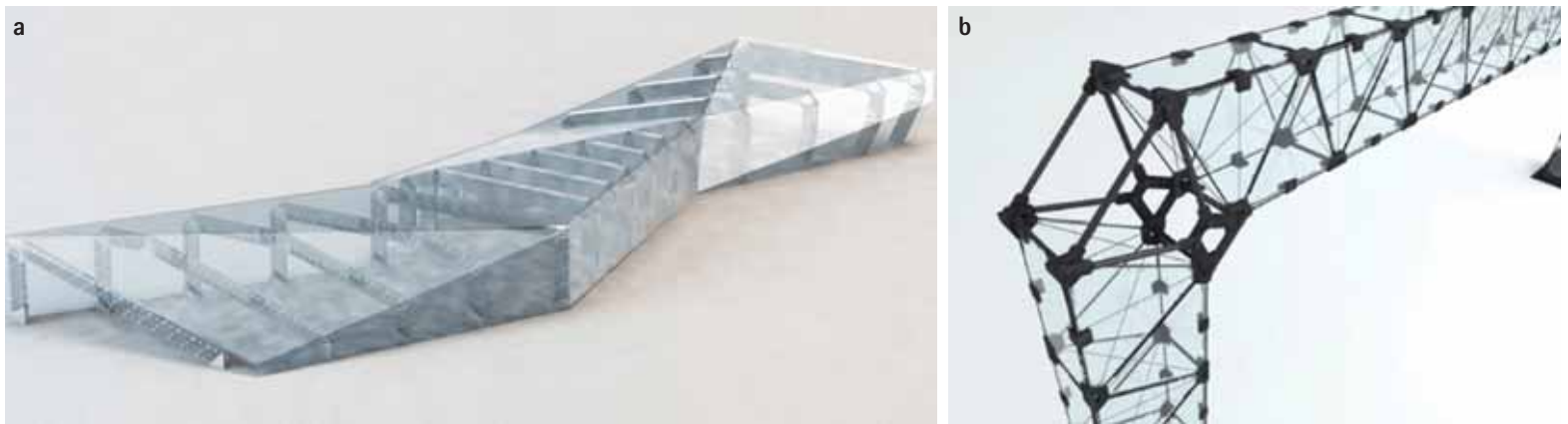


Fig. 2 - Progetto pilota di una Galleria Energetica [13]: (a) vista d'insieme; (b) portale e giunto angolare

## 1. INTRODUZIONE

Nel secolo scorso, grazie alle visioni di alcuni grandi progettisti e al progresso tecnologico, il vetro si è affermato come materiale da costruzione evolvendo dall'utilizzo in elementi secondari, quali ad esempio i pannelli per finestrate, verso l'impiego in elementi strutturali di più alto impegno statico

come travi, colonne, solai, *curtain walls*, coperture, fornendo così una risposta alla crescente richiesta di immaterialità dell'involucro e delle strutture portanti. Le strutture vitree assumono di conseguenza un valore altamente iconico, talvolta semplicemente per mezzo di forme pure, come nel caso del *glass cube* di Apple [1] (figura 1a).

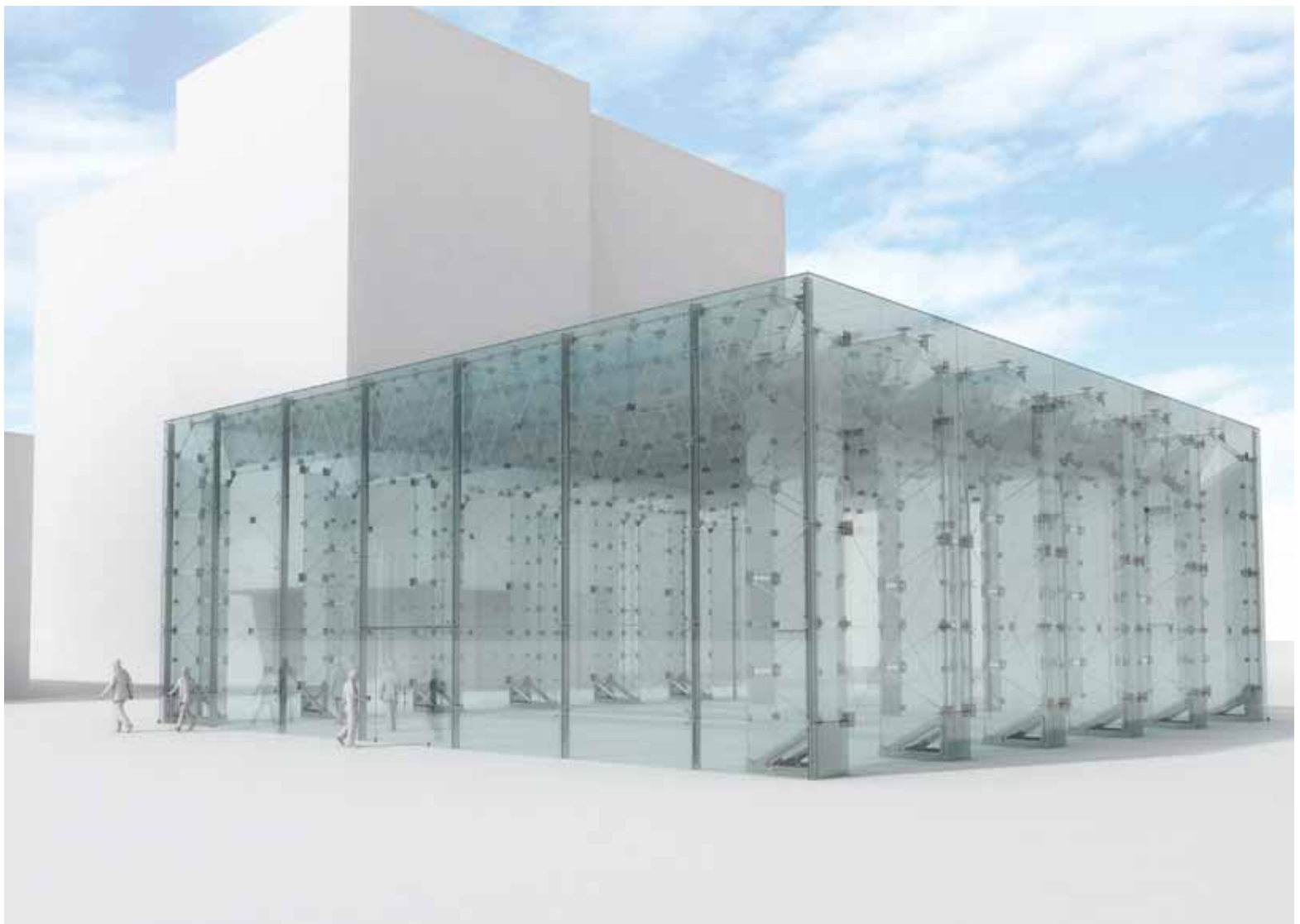


Fig. 3 - Immagine renderizzata del TVT Pavilion

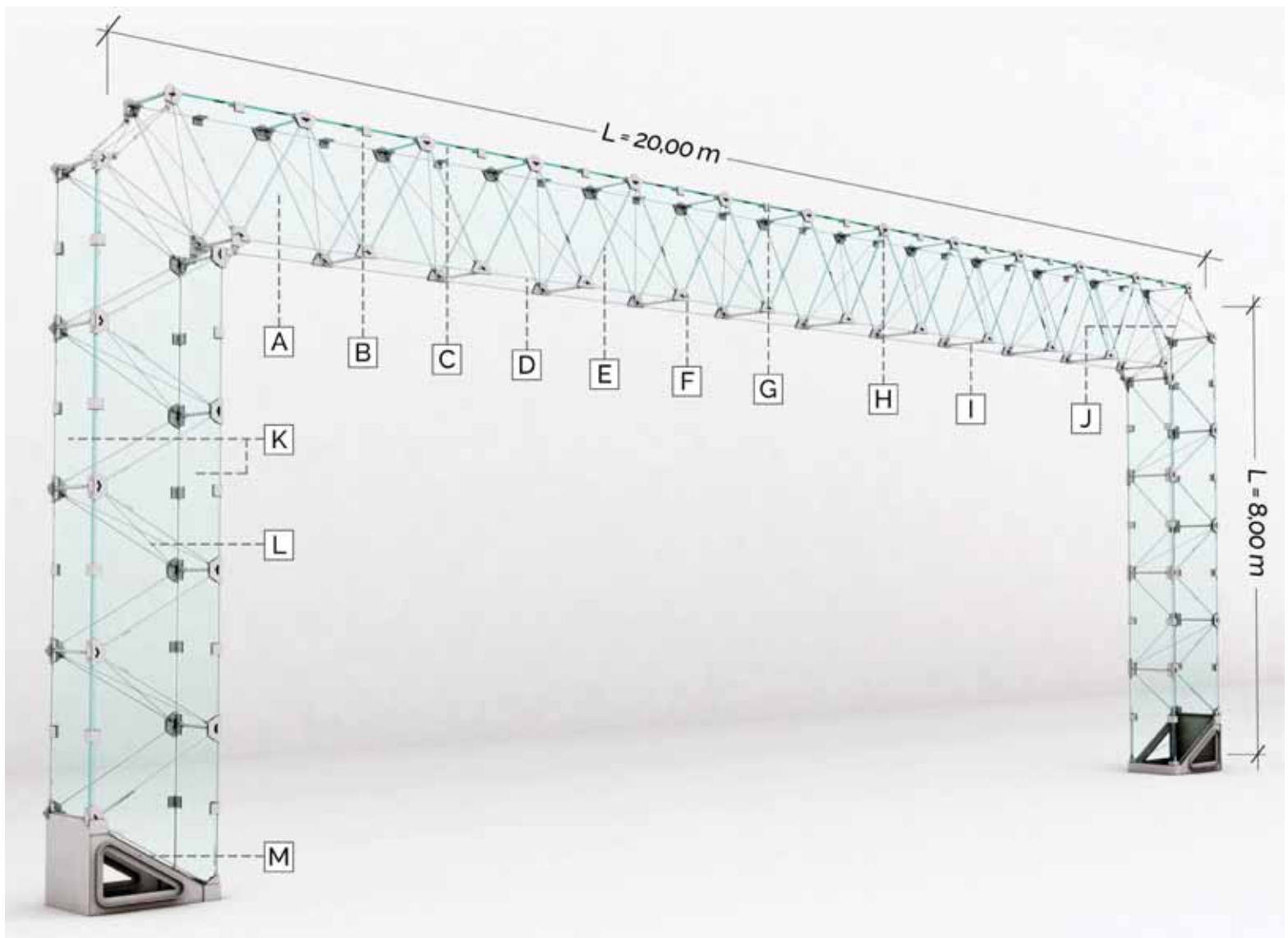


Fig. 4 – Telaio principale in sistema TVT $\gamma$ -bis: A) pannello vitreo triangolare di parete del traverso (lato 1500 mm, spessore 10+1,52+10 mm); B) pannello quadrangolare di estradosso (724×1497 mm, spessore 10+1,52+10 mm); C) trefolo longitudinale superiore preteso  $\varnothing$  11,3 mm; D) trefolo longitudinale inferiore preteso  $\varnothing$  11,3 mm; E) trefolo diagonale preteso  $\varnothing$  9,3 mm; F) nodo quadrivalente inferiore; G) nodo di fissaggio intermedio; H) nodo quadrivalente superiore, vincolo del controvento di falda; I) collegamento trasversale; J) giunto traverso-piedritto; K) pannello quadrangolare per flangia di estradosso e intradosso (724×1497 mm, spessore 10+1,52+10 mm); L) diaframma preteso; M) giunto di base del piedritto.

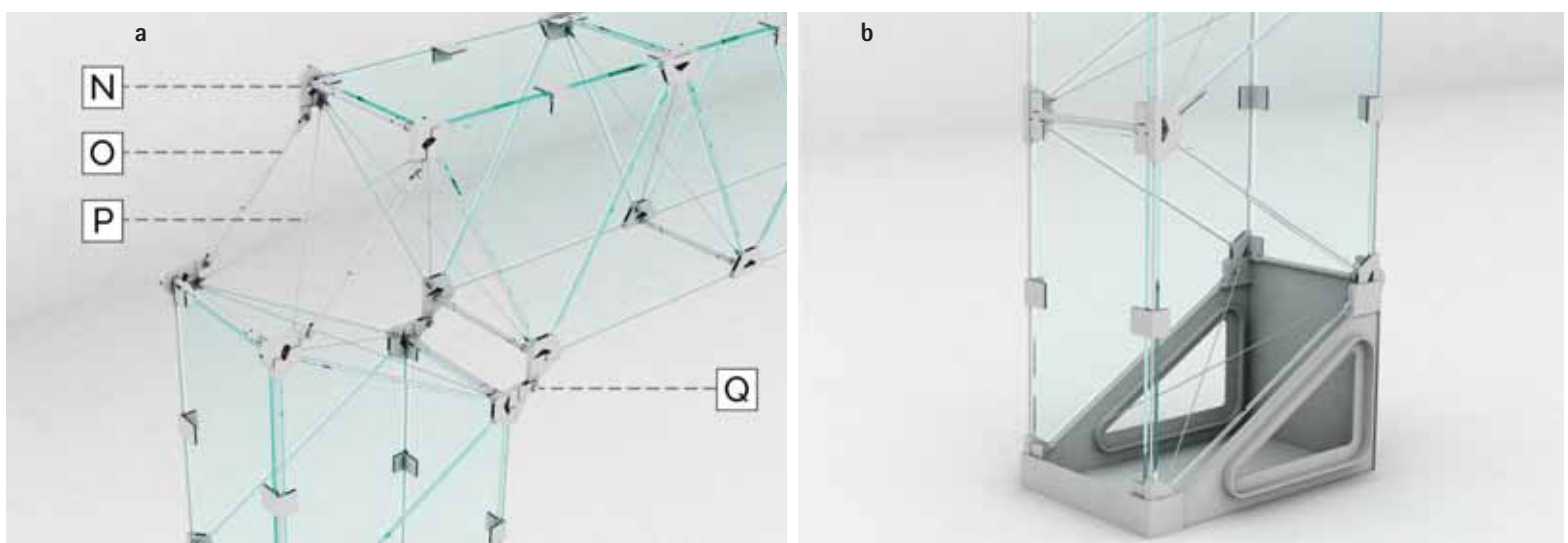


Fig. 5 – Giunzioni del telaio principale in sistema TVT $\gamma$ -bis (a) traverso-piedritto e (b) base del piedritto: N) Nodo di estremità del traverso; O) barra con estremità a forcella e manicotto di regolazione; P) funi a crociera; Q) giunto a pettine con perno M24

Grazie alla trasparenza, alla durabilità e alle innalzate qualità meccaniche, il vetro strutturale ben si presta anche agli interventi sul costruito. Una nuova 'pelle' trasparente viene spesso usata per avvolgere edifici esistenti, migliorandone di conseguenza anche le prestazioni energetiche o creando nuovi spazi come mostrato nella *hall* della Stazione ferroviaria di Strasburgo [2] (figura 1b). Negli impieghi su manufatti di pregio, l'intervento risulta poco invasivo e ben riconoscibile; il valore dell'esistente viene preservato e all'opera viene conferito un aspetto più moderno.

Come ulteriore vantaggio, l'involucro trasparente può essere dotato di nuove funzioni grazie alla capacità del vetro laminato di incapsulare nell'intercalare dispositivi quali celle fotovoltaiche, sistemi luminescenti, sensori e apparecchi programmabili. La centrale trigenerativa Diamante testimonia questo tipo di progettazione integrata in cui i pannelli fotovoltaici *glass-embedded*, corredati di un opportuno sistema di accumulo, colmano il fabbisogno energetico dell'illuminazione pubblica del parco del Pratolino a Firenze [3] (figura 1c).

Tuttavia, le modalità di crisi fragile e la scarsa e aleatoria resistenza a trazione del vetro lo rendono da solo inadatto a superare le grandi luci richieste nelle moderne costruzioni e perciò è necessario ibridarlo con materiali metallici o più in generale duttili, sfruttandone l'azione composita [4]. L'effetto dell'introduzione del rinforzo metallico è duplice: in primo luogo, agisce unendo i lembi di eventuali lesioni in modo analogo alle barre di acciaio nel calcestruzzo fessurato, e inoltre scongiura la crisi fragile e perciò improvvisa dell'elemento. Se il componente metallico viene anche preteso, in modo da esercitare una precompressione nel vetro, la resistenza apparente a trazione di quest'ultimo risulta innalzata (elementi ibridi ad armatura attiva). I vantaggi connessi all'adozione dell'ibridismo sono stati messi in luce da numerose ricerche ed esperienze sperimentali: travi ibride con cavo esterno a singola anima vitrea [5] e a doppia anima [6], travi vitree con rinforzo metallico incollato lungo le fibre tese [7], travi ibride con sezione a T e cavo parabolico [8], travi a sezione scatolare rinforzata [9]. Nonostante le ottime prestazioni attestate, gli esempi citati evidenziano come la ricerca, focalizzandosi prevalentemente sullo sviluppo di travi, si sia limitata all'analisi di sistemi piani. Di conseguenza si riscontra ad oggi la mancanza di sperimentazioni su sistemi costruttivi in grado di estendere il campo di azione alle geometrie tridimensionali e alle grandi luci.

All'interno del filone di ricerca riguardante l'ibridismo vetro-acciaio si collocano le Travi Vitree Tensegrity (TVT), ideate e sviluppate presso l'Università di Pisa, proprietaria dei relativi diritti brevettuali. Questi elementi costruttivi, la cui progettazione è ispirata ai principi del *Fail-Safe Design* (FSD) [10],

aggiungono all'idea dell'ibridismo e della precompressione anche quella della segmentazione della compagine strutturale, la cui integrità globale è garantita esclusivamente mediante la presollecitazione. In tal modo, oltre ad ottenere allo SLU modalità di collasso duttili, superato lo SLE di decompressione viene inibita la formazione delle fessure nel vetro a causa del distacco dei nodi di acciaio dai pannelli vitrei, i quali si sottraggono alla loro messa in trazione [11], [12].

L'intento di progettare tramite il sistema modulare TVT un'opera di alto valore iconico, energeticamente sostenibile e standardizzata, ha portato all'ideazione della Galleria Energetica [13] (figura 2). La ricerca morfologica di questo padiglione è stata influenzata da esigenze architettoniche, energetiche e di *comfort*, che hanno condotto alla definizione di un organismo fortemente sviluppato longitudinalmente e caratterizzato da diverse variazioni nell'inclinazione delle falde di copertura. La soluzione strutturale adottata, dovendo garantire adattabilità e serialità, si è basata sull'utilizzo di portali in sistema TVTγ diversi tra loro per forma e altezza al fine di rispondere ai cambiamenti in sezione e in pianta.

Le giunzioni trave-piedritto sono state concepite tramite aste tubolari a sezione circolare di lunghezza variabile, regolabili per avvvitamento di adeguati manicotti, in modo da consentire la formazione di angoli variabili fra piedritto e trasverso. Mentre nel proprio piano i telai sono sufficientemente rigidi e resistenti, la funzione di controvento longitudinale è assolta da apposite aste telescopiche in acciaio, tamponate da pannelli in vetro, i quali non sono perciò chiamati a svolgere alcuna funzione stabilizzante.

Nell'ambito delle principali tendenze di ricerca relativa all'ibridismo vetro-acciaio, il sistema costruttivo della Galleria Energetica è stato ulteriormente sviluppato attraverso la definizione di un nuovo modello progettuale. Obiettivo del presente lavoro, quindi, è stato quello di investigare la fattibilità architettonica, strutturale e tecnologica di un padiglione trasparente denominato *TVT pavilion*, basato sulle seguenti innovazioni:

- L'uso di un telaio principale evoluto di tipo TVTγ-bis di luce 20 metri circa, derivato dalla TVTγ mediante la sostituzione delle barre pretese con trefoli che innalzano trasparenza, resistenza allo SLU e duttilità;
- La semplificazione e la smaterializzazione del giunto angolare fra trasverso e montante, sostituendo le aste tubolari con barre regolabili, nonché del giunto alla base dei montanti;
- Un sistema di controventamento di falda e di parete trasparente e diffuso, costituito da pannelli ibridi, precompressi e modulari.

Sul piano analitico, lo studio teorico del comportamento meccanico del *TVT Pavilion* è stato affrontato a più livelli, dal

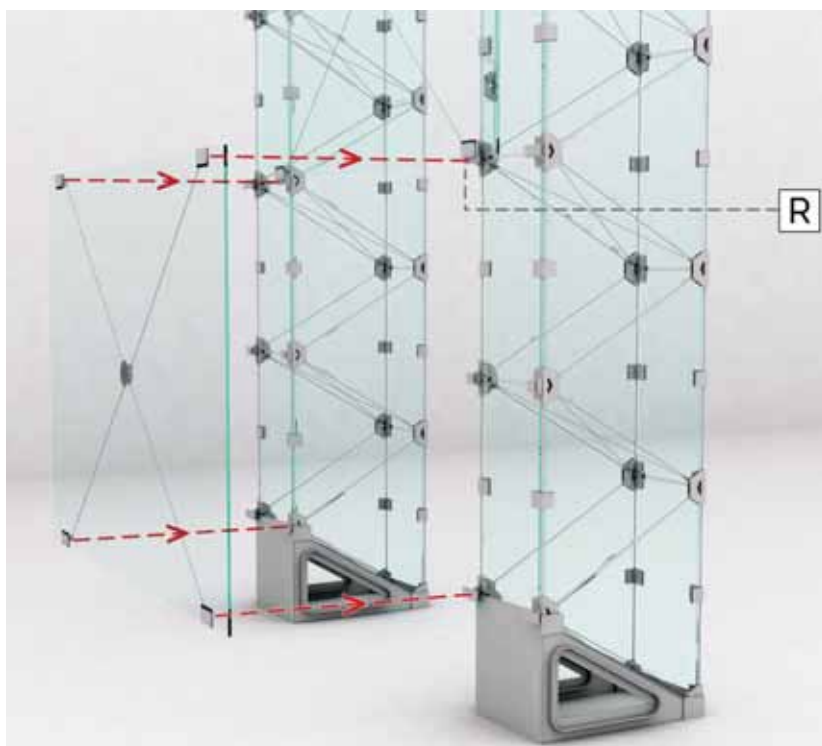


Fig. 6 – Sistema di controvento ibrido longitudinale di parete: R) dispositivo di ancoraggio delle estremità del pannello di controvento al nodo del telaio TVT $\gamma$ -bis mediante tacco e piolo

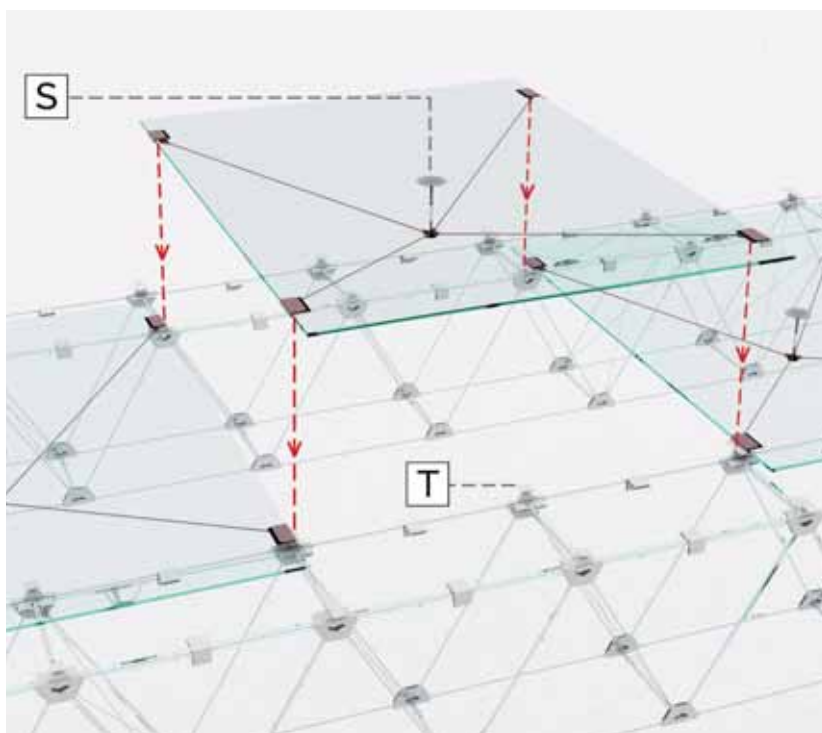


Fig. 7 – Sistema di controvento ibrido longitudinale di falda: S) puntone metallico; T) nodo monolaterale di appoggio intermedio per il pannello

locale al globale, superando le difficoltà che avevano relegato le investigazioni strutturali della Galleria Energetica al solo telaio. Dopo la descrizione strutturale e geometrica del padiglione e delle sue componenti, sono presentate nel seguito le strategie di modellazione numerica e di analisi, accompagnate dalla discussione dei principali risultati.

## 2. DEFINIZIONE GEOMETRICA E STRUTTURALE DEL TVT PAVILION

Il padiglione ha la forma di un parallelepipedo a pianta rettangolare lungo 21940 mm, largo 20595 mm ed alto 8076 mm [14]. L'intero involucro vitreo è sostenuto da 6 telai di luce netta 20395 mm, posti ad interasse di 4300 mm. I principali elementi strutturali costituenti il *TVT Pavilion* sono dunque: i telai trasversali, la struttura di controventamento di falda e di parete, le facciate anteriore e posteriore (figura 3).

### 2.1 Telai trasversali

Il telaio trasversale di base è un portale monopiano e monocam-pata che utilizza il sistema costruttivo denominato TVT $\gamma$ -bis sia per il traverso che per i due piedritti (figura 4). In questo sistema costruttivo, l'impiego di trefoli come armatura longitudinale e di parete, in sostituzione delle barre pretese, evita la presenza di punti di giunzione intermedi e conseguentemente la diminuzione di area resistente. Inoltre, grazie all'elevato limite di snervamento del trefolo, è necessaria una minor sezione trasversale con notevoli guadagni sia in termini meccanici che di trasparenza. La progettazione è tale da mantenere i vantaggi allo SLU e allo SLE manifestati dai precedenti sistemi TVT e confermati da numerose evidenze sperimentali.

Il traverso in sistema TVT $\gamma$ -bis ha una sezione a U rovescia composta da pannelli vitrei: ciascuna delle due anime segmentate, distanziate di 800 mm, è costituita da una successione di 23 pannelli triangolari equilateri di lato 1500 mm organizzati in schema *Warren* ([A] di figura 4), mentre la flangia orizzontale superiore è realizzata da una successione di 12 pannelli quadrangolari ([B] di figura 4). La distanza trasversale tra gli appoggi superiori della trave è di 18856 mm, l'altezza netta della stessa è di 1401 mm. Le due pareti gemelle d'anima sono accoppiate mediante traversi a sezione tubolare [I] avvitati ai 25 nodi metallici, opportunamente forniti di perni. Come provato dalle successive analisi, non si è reso necessario l'inserimento di pannelli rettangolari vitrei al lembo compresso delle estremità del traverso. Perciò è stata mantenuta la sezione a U rovescia per l'intero sviluppo della trave, beneficiando di un ridotto peso e della semplicità tecnologica e di assemblaggio.

I piedritti sono dotati di una sezione scatolare vitrea in sistema TVT $\gamma$ -bis per un'altezza di 7271 mm. Ciascuna delle due pareti parallele al piano medio del telaio è composta da 8 lastre triangolari vitree connesse mediante 10 giunti metallici e altrettanti collegamenti trasversali, mentre le flange ([M] di figura 4) sono entrambe realizzate da 4 lastre rettangolari.

Nel giunto agli angoli del portale (dettaglio [J] di figura 4) i 4 nodi di estremità della trave sono collegati ai rispettivi 4 nodi dei piedritti (figura 5a). All'estradosso, il collegamento è ottenuto tramite una coppia di barre con estremità a forcella e perno M14, regolabili centralmente mediante un manicotto filettato (dettaglio [O] di

figura 5). Una coppia di funi a crociera aumenta la rigidezza torsionale (dettaglio [P] di figura 5a). All'intradosso, il collegamento dei nodi di estremità avviene tramite un giunto a pettine con perno M24, eccentrico di 65 mm rispetto ai nodi TVT $\gamma$ -bis (dettaglio [Q] di figura 5a). Graduando opportunamente la lunghezza delle barre di estradosso si possono ottenere ampiezze dell'angolo tra piedritto e montante comprese tra 60° e 120°, con possibilità di soddisfare numerose esigenze architettoniche.

Il giunto alla base dei piedritti (figura 5b) trasmette alla fondazione le azioni del portale e risolve il problema del passaggio dal piano di posa alla geometria segmentata triangolare. Una coppia di piastre di diversa altezza ripristina la continuità delle flange di intradosso ed estradosso; le anime, invece, si compongono di una coppia di piastre triangolari con foro triangolare omotetico irrigidito da una nervatura trasversale. In tal modo, pur innalzando il rapporto tra parti vuote e piene della connessione, si crea una maglia chiusa triangolare molto rigida la cui sezione resistente è cruciforme.

La sequenza costruttiva del *TVT Pavilion* avviene secondo le seguenti fasi:

- Posizionamento dei pilastri e loro precompressione;
- Assemblaggio a piè d'opera e presollecitazione delle traverse fino alla compensazione della freccia da peso proprio strutturale e portato;
- Installazione delle traverse sui pilastri e loro vincolamento;
- Montaggio dei pannelli verticali laterali;
- Montaggio delle lastre di copertura.

## 2.2 Il controventamento di falda e di parete

Il rivestimento esterno del *TVT Pavilion* funge anche da controventamento longitudinale (figure 6 e 7) ed è realizzato da una serie di pannelli vitrei, ibridi e precompressi, solidali ai portali. La strategia adottata per il contrasto delle azioni orizzontali è stata quella del controventamento diffuso, rispondente ai principi di ridondanza e robustezza del FSD. Infatti, tutti i pannelli sono contemporaneamente attivati all'insorgenza dell'azione e trasferiscono la stessa in modo diffuso ai telai. Inoltre, in caso di accidentale rottura di uno di essi, i rimanenti pannelli sono in grado di assorbire il sovraccarico aggiuntivo con un percorso alternativo.

Il pannello rettangolare trasparente traduce in soluzione ibrida vetro-acciaio il classico controvento metallico di campo a crociera: una lastra rettangolare vitrea HSG a tre strati (due strati strutturali da 8 mm ed uno strato sacrificale esterno da 5 mm; intercalare in PVB da 1,52 mm) viene precompressa mediante una coppia di cavi diagonali pretesi incrociati, le cui estremità si installano ai vertici del pannello. In tal modo, lungo le diagonali del pannello vengono indotti dei flussi di compressione in grado di compensare le trazioni indotte dall'esterno. Inoltre, le armature metalliche intervengono ad assorbire le trazioni diagonali nel caso di fessurazione accidentale del pannello vitreo.

Il trasferimento delle azioni mutue tra pannello vitreo e crociera metallica avviene all'interfaccia di appositi incavi realizzati nel vetro, i quali consentono l'ingresso di un tacco

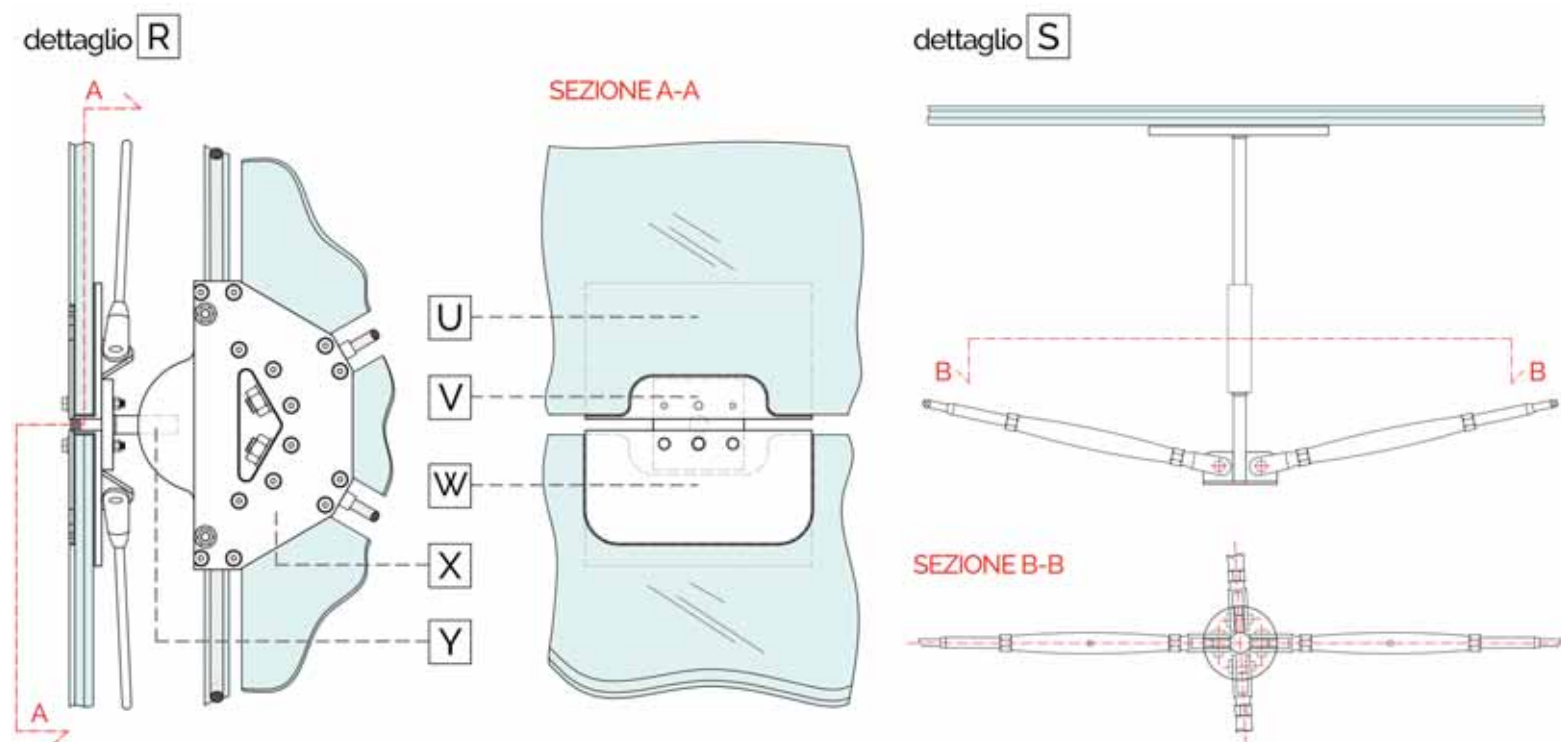


Fig. 8 – Viste di dettaglio dei pannelli di controvento: U) Pannello vitreo con incavo sagomato raggiato; V) tacco di contrasto in acciaio saldato su piastra fornita di perno per il tirante; W) piastra di chiusura; X) nodo del telaio TVT $\gamma$ -bis; Y) piolo in acciaio

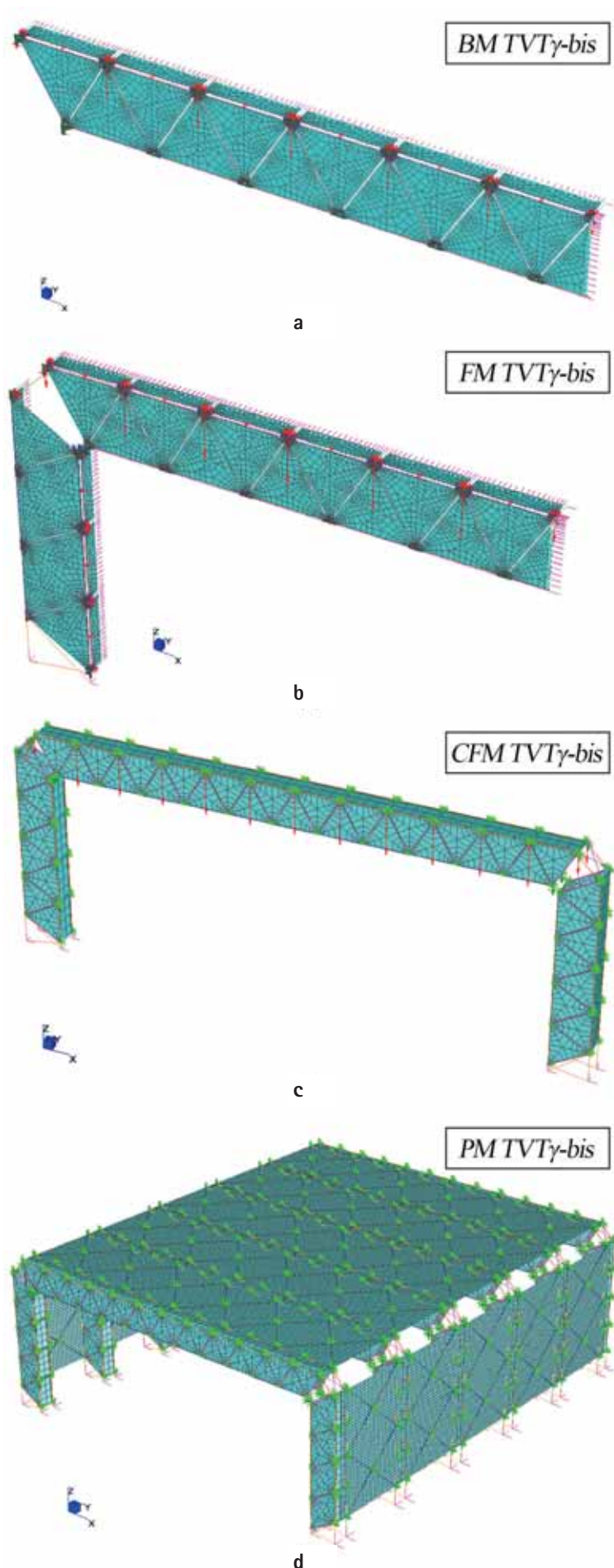


Fig. 9 - Modelli FEM:  
 (a) BM TVT $\gamma$ -bis; (b) FM TVT $\gamma$ -bis; (c) CFM TVT $\gamma$ -bis; (d) PM TVT $\gamma$ -bis

metallico di contrasto (dettaglio [W] di figura 8). La funzione di questo dispositivo meccanico è la stessa che il nodo esplica nel telaio, ovvero trasferisce per semplice contatto unilaterale le tensioni di compressione al vetro. La coppia di cavi viene fissata all'intradosso del pannello tramite una piastra saldata al di sotto del tacco. Dunque, il pannello vitreo viene presollecitato a piè d'opera. La posa del pannello di controvento avviene per bullonatura di questi contrasti a una piastra dotata di piolo metallico (dettaglio [X] di figura 8), quest'ultimo avvitato ai nodi di estradosso dei telai TVT $\gamma$ -bis sottostanti.

I controventi di falda e quelli di parete si differenziano per la posizione dei cavi a crociera rispetto al pannello vitreo e dunque per la modalità di precompressione. Nei pannelli del controventamento di parete, le barre diagonali pretese agiscono in un piano aderente a quello della lastra di vetro (figura 6). Nel punto d'intersezione delle barre è incollata al vetro per laminazione una borchia metallica allo scopo di favorire una migliore redistribuzione delle tensioni lungo il piano medio.

In copertura, a causa della presenza dei carichi verticali in fase d'esercizio (figura 7), il pannello di vetro non viene precompresso parallelamente al suo piano medio bensì secondo uno schema statico assimilabile a quello di una trave sbadacchiata. Le barre diagonali si incontrano all'estremo inferiore di un puntone metallico a sezione circolare, posto in corrispondenza del baricentro del pannello vitreo. La pretensione dei tiranti diagonali innesca nel sistema una precompressione di entità tale da favorire una monta nella mezzeria del pannello. Quest'ultima è in grado di annullare la freccia prodotta dal peso proprio. Al fine di escludere eccessive concentrazioni di tensione, tra l'estremo superiore del puntone e la lastra di vetro è incollato per laminazione un piatto circolare di diametro 200 mm (dettaglio [S] di figura 8). Inoltre, in corrispondenza della mezzeria del lato minore del pannello di controvento, il carico fuori dal piano è ulteriormente supportato da un dispositivo di appoggio a piastra e piolo avvitato sul nodo di portale sottostante (dettaglio [T] di figura 7).

Così composti, i dispositivi di controventamento risultano completamente trasparenti, esclusa la minimale presenza dei cavi a crociera e del rispettivo collegamento baricentrico. Gli stessi pannelli fanno parte dell'involucro e sono attrezzabili in maniera integrata in modo tale da garantire, oltre ai requisiti strutturali, le necessarie capacità di isolamento, schermatura, tenuta all'acqua ed eventuale produzione energetica e funzioni ICT. Compatibilmente con le esigenze di modularità e standardizzazione, al fine della riduzione dei costi di produzione, sono state definite solo 2 tipologie di lastre in copertura e 2 per le pareti laterali.

### 2.3 Le facciate frontali

Le facciate frontali tamponano il primo e l'ultimo telaio tra-

sversale TVT $\gamma$ -bis. Ciascuna di esse ricopre una superficie di circa 160 m<sup>2</sup> (20595×8076 mm) e si compone di 40 pannelli raggruppabili in 4 tipologie di lastre standardizzate. La parete è stata progettata come una superficie continua vetrata sorretta da montanti in alluminio a sezione ellittica nervata. Un'asolatura in testa a ogni montante garantisce il trasferimento alla struttura delle sole azioni fuori dal piano della facciata e contemporaneamente esclude il trasferimento di forze verticali. Gli interassi dei piedritti sono scanditi in funzione della geometria del telaio TVT $\gamma$ -bis.

Ogni pannello di vetro è supportato puntualmente ai vertici mediante un sistema commerciale tipo *spider*. Un giunto di silicone strutturale da 15 mm consente le deformazioni e le tolleranze tra i diversi elementi.

### 3. MODELLAZIONE E ANALISI

L'analisi del comportamento meccanico, finalizzata a verificare la resistenza e la stabilità sia dell'opera globale che dei suoi singoli componenti, è stata effettuata mediante modelli numerici agli elementi finiti (FEM). Sono stati realizzati modelli numerici multiscala, locali e globali, a partire dallo studio della trave e del telaio, fino alla definizione dell'intera struttura. Nei diversi modelli sono state condotte analisi elastiche lineari e non lineari introducendo non linearità materiche, vincolari e geometriche. I principali modelli globali realizzati sono riportati in figura 9 e qui di seguito elencati:

a) *BM TVT $\gamma$ -bis (Beam Model)*: modello tridimensionale di un

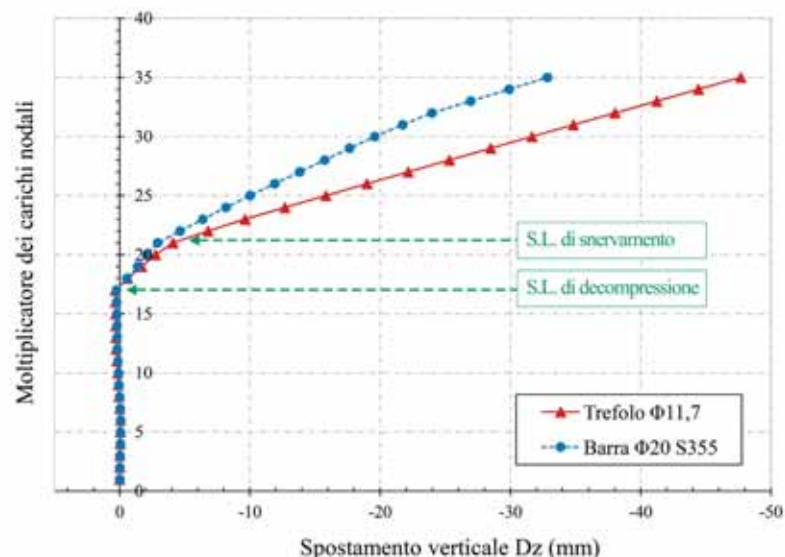


Fig. 10 - Confronto tra travi armate TVT $\gamma$ -bis con armatura attiva a barre pretese e a trefoli pretesi: moltiplicatore di carico-spostamento in mezzeria

quarto di trave, ottenuto in base a considerazioni di simmetria geometrica e dei carichi, usato per interpretare il comportamento di trave incernierata ai nodi di estremità e per studiare i fenomeni di instabilità.

b) *FM TVT $\gamma$ -bis (Frame Model)*: modello tridimensionale comprendente un quarto di trave e metà piedritto, simmetrico rispetto alla mezzeria del portale e al piano medio del telaio, utilizzato per studiare il comportamento globale dell'insieme trave-piedritto. Esso è, in particolare, finalizzato alla de-

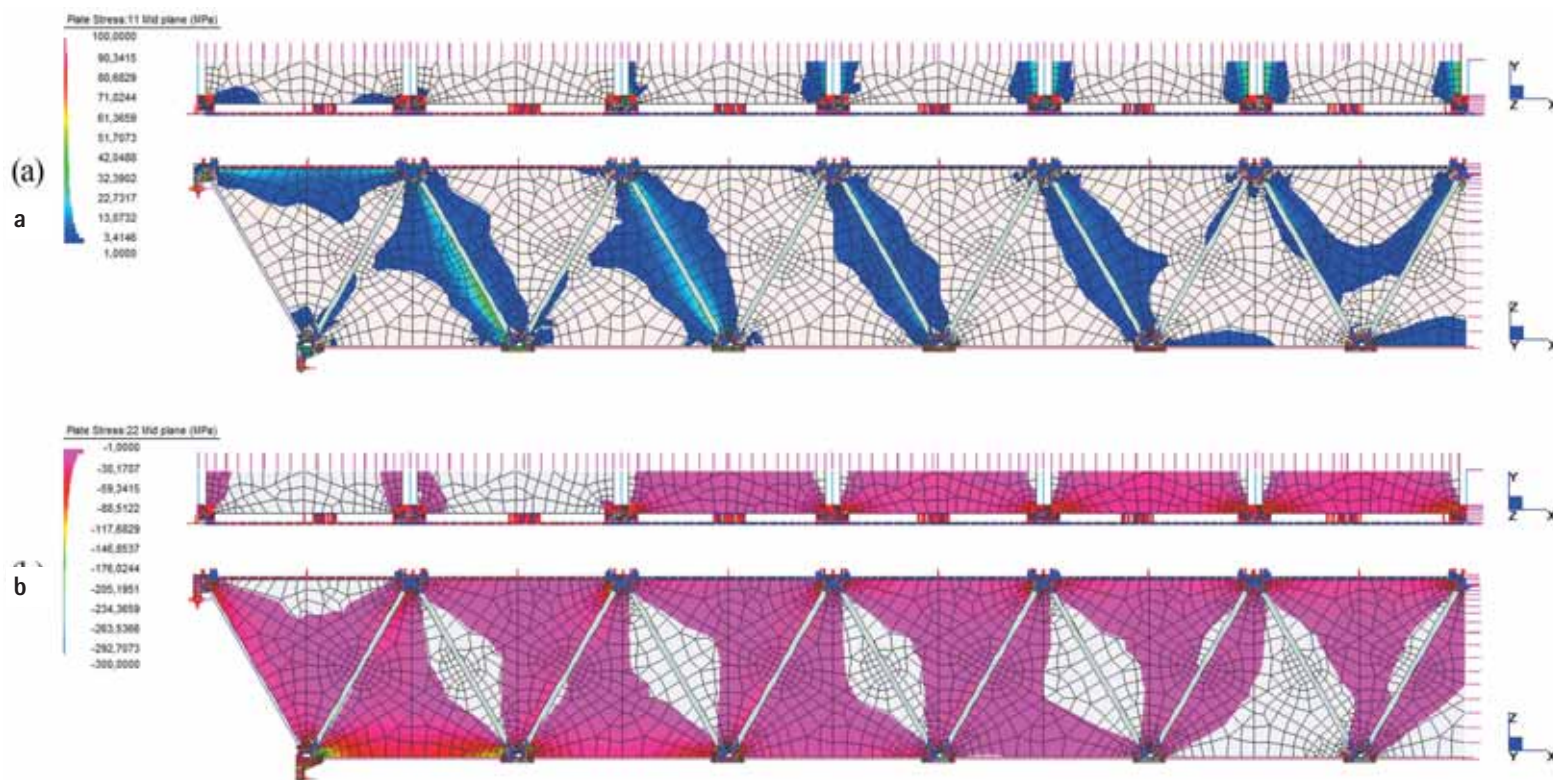


Fig. 11 - BM TVT $\gamma$ -bis, risultati analisi statica non lineare allo SLU: (a) tensioni di trazione; (b) tensioni di compressione



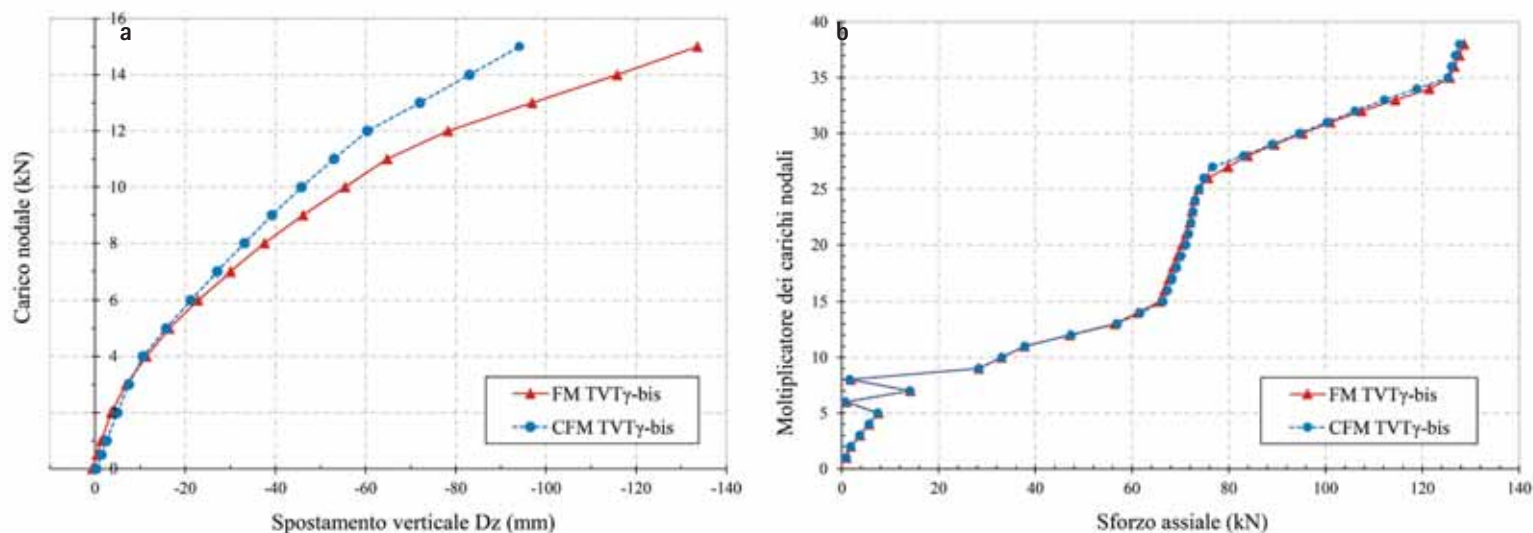


Fig. 12 – Confronto tra i risultati ottenuti con i due modelli FM TVT $\gamma$ -bis e CFM TVT $\gamma$ -bis: (a) grafico spostamento in mezzeria-moltiplicatore dei carichi nodali; (b) sforzi assiali agenti nella mezzeria del corrente inferiore.

finizione ed alla valutazione meccanica del giunto d'angolo del portale.

c) *CFM TVT $\gamma$ -bis (Complete Frame Model)*: modello tridimensionale rappresentativo dell'intero telaio, semplificato ma calibrato rispetto al precedente in modo da ottenere le stesse prestazioni statiche ed essere utilizzato come telaio del PM TVT $\gamma$ -bis.

d) *PM TVT $\gamma$ -bis (Pavilion Model)*: modello globale dell'intera opera costituito da 6 CFM TVT $\gamma$ -bis e dai pannelli di involucro esterno.

Le imperfezioni (geometriche, del sistema, della distribuzione dei carichi), che usualmente vengono tradotte in un campo di spostamenti anelastici equivalente, non sono state prese in considerazione nelle modellazioni appena citate ma unicamente nella fase di dimensionamento della trave. Infatti, negli studi dei precedenti sistemi TVT, si è osservato che i risultati del modello numerico sono scarsamente sensibili alle imperfezioni. Infine, i pannelli sacrificali sono considerati solo con la loro influenza in termini di peso, mentre, a favore di sicurezza, l'*interlayer* dei pannelli laminati è stato modellato solo come un vincolo fuori dal piano trascurandone la rigidità a taglio.

### 3.1 Modello BM TVT $\gamma$ -bis

Nella fase preliminare, la trave è stata dimensionata secondo lo schema *Warren* allo scopo di localizzare la distribuzione delle compressioni e delle trazioni attese nei correnti e diagonali. Successivamente, è stato costruito un modello tridimensionale con elementi *beam* quali aste, *cable* come trefoli, *plate* per i pannelli e varie tipologie di *link* per modellare i contatti e le parti rigide, sulla base delle acquisite esperienze. Lo spessore delle lastre vitree di 10+1,52+10 mm è stato validato da una

opportuna analisi di *buckling* non lineare in un modello locale di concio di trave composto da due pannelli triangolari di parete ed uno rettangolare superiore.

Nella modellazione in esame, i vincoli assegnati al sistema sono di cerniera in corrispondenza dei nodi metallici di estremità e vincoli a bipendolo lungo tutti i punti dei piani di simmetria, ovvero piano trasversale in mezzeria della trave e piano medio longitudinale. Il peso proprio della struttura è calcolato automaticamente a partire dalla densità dei materiali, mentre, per le analisi non lineari, i carichi esterni applicati ai nodi sono incrementati ad assegnati intervalli di carico (figura 9a).

Una apposita analisi comparativa sul sistema TVT $\gamma$ -bis è stata eseguita al fine di scegliere la soluzione migliore tra l'armatura attiva a barre pretese oppure a trefoli pretesi, quest'ultima poi definitivamente adottata. Il carattere non lineare di entrambe le tipologie di armature metalliche è stato introdotto nel modello tramite un differente legame sforzo-deformazione del materiale. Dal confronto tra le due travi si evince una perfetta sovrapposizione dei grafici moltiplicatore-spostamento per quanto concerne la prima fase di carico, ovvero fino all'attingimento dello stato limite di decompressione dei pannelli (figura 10).

Superato questo limite, si ha una sostanziale differenza di rigidità: la trave armata con barre pretese subisce a parità di carico una minore deformazione, tuttavia manifesta anche una minore duttilità. Al contrario, i trefoli permettono l'attingimento a maggiori risorse duttili, seppur questa soluzione manifesti un minore rigidità.

L'analisi FEM del *BM TVT $\gamma$ -bis* ha confermato il comportamento statico atteso dalle distribuzioni degli sforzi normali nei correnti calcolati secondo il modello *Warren*, mentre, a livello

deformativo, il confronto è poco rilevante in quanto la deformabilità dipende principalmente dai pannelli triangolari vetri appartenenti al piano verticale.

I risultati più significativi sono riportati in figura 11, dove sono mostrate le tensioni massime di trazione e compressione per analisi statiche non lineari, superato il limite di decompressione. Le sollecitazioni maggiori si distribuiscono lungo le zone prossime all'estremità, dove le trazioni nel vetro sono comunque contenute entro il limite di 9 MPa.

### 3.2 Modelli FM TVT $\gamma$ -bis e CFM TVT $\gamma$ -bis

Il modello in esame (figura 9b) mette in luce il preciso comportamento statico e deformativo del traverso, influenzato dalla rigidità offerta dal giunto e dal piedritto. All'intradosso, il giunto a pettine della connessione angolare è stato modellato tramite elementi *plates*, mentre il vincolo a perno dei nodi è stato schematizzato con elementi *link* e *beam*; la barra tra i nodi di estradosso è costituita da elementi *beam*.

In questa configurazione il trefolo longitudinale inferiore raggiunge lo snervamento in corrispondenza della mezzeria per un carico ai nodi prossimo ai 12 kN, manifestando come prevedibile deformazioni superiori a quelle del modello precedente. Tuttavia questa configurazione di carico nodale uniforme non rispecchia la reale richiesta progettuale, in cui l'appoggio intermedio della lastra di controvento (dettaglio [T] della precedente figura 7) sostiene un carico circa 3 volte inferiore di quello dei nodi adiacenti (ovvero quelli provvisti di tacco e piolo).

In mezzeria si registra il maggior sforzo assiale nel relativo tratto del corrente inferiore e dunque il maggiore distacco dei pannelli vetri dagli alloggiamenti nodali in corrispondenza del vertice inferiore del pannello. Sul piano deformativo, una aggiuntiva monta iniziale al traverso viene esercitata con una ulteriore pretensione dei trefoli di estradosso dei piedritti.

L'elevato livello di dettaglio raggiunto dal FM TVT $\gamma$ -bis ne ha limitato l'implementazione in un modello globale rappresentativo del PM TVT $\gamma$ -bis. Pertanto esigenze di snellezza computazionale hanno richiesto il ricorso ad una modellazione semplificata che garantisca risultati paragonabili ai precedenti. A questo scopo è stato realizzato il CFM TVT $\gamma$ -bis (figura 8c), il quale è caratterizzato da una risoluzione geometrica meno dettagliata sia in termini di suddivisione delle superfici sia nella riduzione dei punti di contatto unilaterale *link* tra nodi e vetro; le flange composte da pannelli vetri rettangolari sia della trave che dei piedritti sono state modellate come *beam-equivalenti*, definiti da apposite leggi sforzo-deformazione dedotte da analisi locali dei pannelli.

I risultati ottenuti mostrano un forte accordo in termini di prestazioni allo SLU: dalla figura 12a si evince una sovrapposizio-

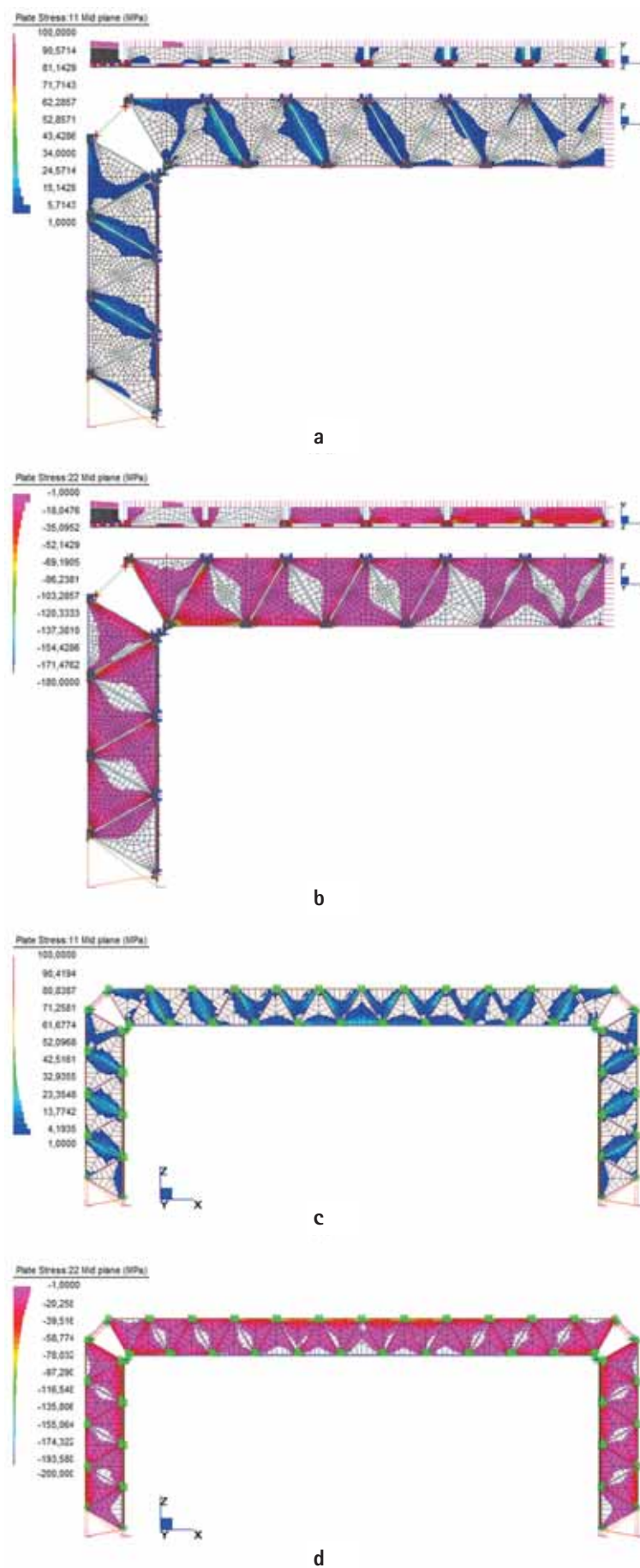


Fig. 13 - Risultati analisi statica non lineare allo SLU e confronto tra FM TVT $\gamma$ -bis (a), (b) e CFM TVT $\gamma$ -bis (c), (d): (a) e (c) tensioni di trazione; (b) e (d) tensioni di compressione.

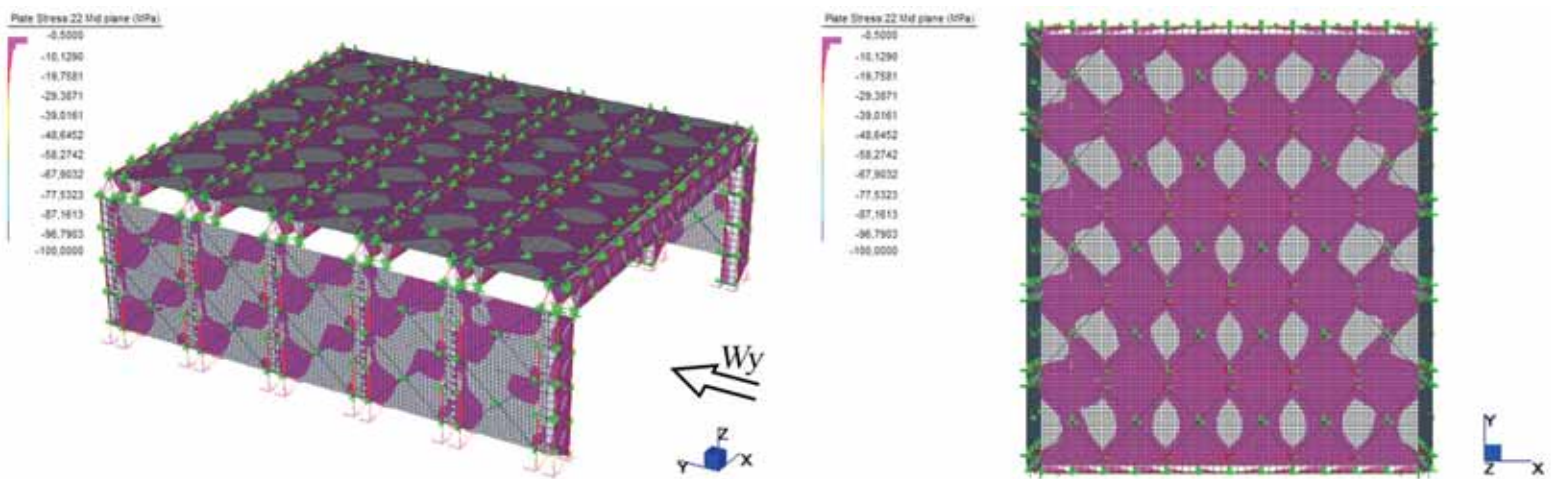


Fig. 14 - PM TVT $\gamma$ -bis, risultati analisi statica non lineare allo SLU, tensioni di compressione: (a) vista globale; (b) pianta.

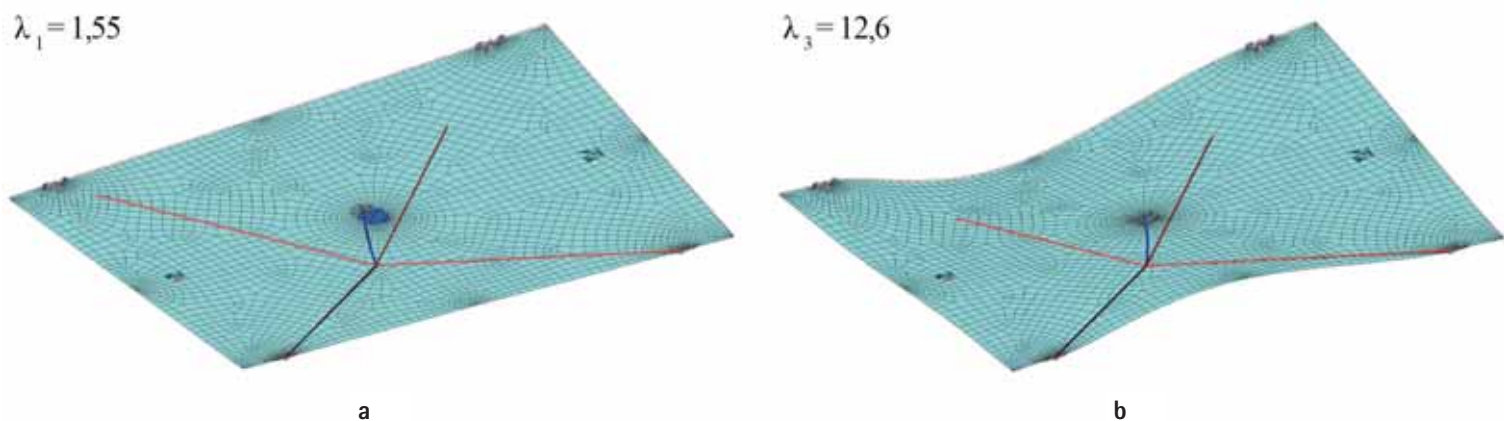


Fig. 15 - Modi significativi dell'analisi di buckling per il controvento di falda

ne delle curve dei due modelli a telaio fino alla messa in opera di tutti gli elementi costituenti ed una consecutiva maggiore rigidità della curva che definisce il comportamento del CFM TVT $\gamma$ -bis sotto carichi d'esercizio. In questo secondo tratto, sia lo stato limite di decompressione dei pannelli che il successivo snervamento dei trefoli, avvengono per i medesimi carichi nodali, ma con spostamenti che differiscono del 10%.

Nonostante le semplificazioni introdotte, le tensioni dei pannelli calcolate con i due modelli risultano in buon accordo tra loro se valutate a un'opportuna distanza dai vertici degli stessi, dove l'influenza da localizzati fenomeni di picco è mitigata (figura 13). Gli sforzi assiali nei correnti superiori risentono degli elementi *beam*-equivalenti, pertanto non è possibile distinguere con precisione le sollecitazioni competenti al vetro da quelle dei trefoli superiori. Il comportamento dei correnti inferiori dei due modelli, come si osserva in figura 12b, è invece in perfetto accordo. Questo risultato abilita l'uso del CFM TVT $\gamma$ -bis all'impiego come telaio nel modello globale PM TVT $\gamma$ -bis, realizzato allo scopo di verificare il carico ultimo di collasso e il rispetto della gerarchia strutturale del FSD.

### 3.3 Modello PM TVT $\gamma$ -bis

Il modello PM TVT $\gamma$ -bis (precedente figura 9d) è composto da 6 modelli CFM TVT $\gamma$ -bis posti ad un interasse di 4300 mm e controventati da superfici planari discretizzate riprodotte sia i pannelli di copertura che quelli laterali. Le facciate sono state escluse da questa modellazione ed è stata computata unicamente l'azione da esse trasmessa ai nodi dei portali di estremità dovuta al vento. Tale semplificazione è compatibile con il funzionamento strutturale dell'opera; l'analisi e la verifica delle facciate è stata condotta separatamente secondo le linee guida della CNR DT 210 [15].

I pannelli costituenti l'involucro sono collegati ai telai tramite elementi *link*, riprodotte la geometria ed il funzionamento dei tacchi. Infatti, nella fase di precompressione del vetro, i *link* consentono lo spostamento relativo dei vertici dei pannelli sotto la pretensione delle barre, e successivamente, consentono la trasmissione delle azioni longitudinali e trasversali tra i telai.

Le azioni considerate nell'analisi del PM TVT $\gamma$ -bis sono peso proprio, vento (trasversale e longitudinale), neve e carico va-

riabile di copertura, come da [16]. Ritenuta preponderante l'azione del vento, l'opera è stata posizionata nella provincia di Trieste al fine di massimizzarne l'entità del carico. Le combinazioni sismiche, a causa delle non elevate masse in gioco, non sono state considerate nell'analisi poiché di effetto inferiore alle azioni eoliche. Lo schema di carico per le analisi non lineari effettuate ricalca le sequenze di montaggio dell'opera. Nelle combinazioni con azione del vento dominante, si osservano le sollecitazioni maggiori sull'involucro e la caratteristica formazione di meccanismi resistenti tipo tirante-biella (figura 14) nel piano medio dei pannelli di controventamento laterale e di copertura. La precompressione, imposta in fase di montaggio del pannello, favorisce l'assorbimento delle tensioni di trazione che si sviluppano nella fase d'esercizio del padiglione. Contenute all'interno dei limiti posti dalle raccomandazioni tecniche [15], le tensioni maggiori si registrano nelle lastre dei telai principali, dove i valori di trazione sono sovrastimati rispetto a quelle del FM TVT $\gamma$ -bis garantendo un ulteriore margine di sicurezza.

Nessun fenomeno di crisi locale o globale è stato riscontrato al variare delle combinazioni di carico e lo sforzo assiale nei correnti di mezzera, quali elementi metallici più sollecitati, non attinge in nessun caso al limite di snervamento. All'aumentare del carico, lo stato limite ultimo per snervamento del trefolo inferiore del traverso precede sempre quello di instabilità locale dei pannelli, nel rispetto del principio di gerarchia strutturale e duttilità. Inoltre il fenomeno instabile nel pannello è calibrato secondo le modalità di crisi illustrate in figura 15. Nella fattispecie per un controvento ibrido di falda soggetto ad azione del vento, i primi modi instabili riguardano il puntone metallico, mentre solo mobilitando carichi maggiori il pannello vitreo abbandona la sua configurazione di equilibrio. Ulteriori margini di sicurezza possono essere raggiunti aumentando la sezione del puntone metallico.

Per quanto concerne il controllo degli spostamenti allo SLE, il modello *PM TVT $\gamma$ -bis* risulta inadatto per questa lettura, essendo stato concepito in base a equivalenze di prestazioni statiche allo SLU. Si rende quindi necessaria una modellazione più sofisticata al fine di superare le semplificazioni introdotte.

#### 4. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

L'ibridismo vetro-acciaio si conferma come unica strategia costruttiva in grado di permettere a strutture in vetro il raggiungimento di grandi luci nel rispetto del FSD. Il sistema costruttivo TVT segmentato e precompresso affianca all'ottimizzazione del comportamento meccanico dei due materiali elevate prestazioni allo SLU e allo SLE ed elevata standardizzazione dei componenti strutturali.

Le scelte tecniche e tecnologiche adottate nel progetto di un

padiglione vitreo ibrido TVT di grandi dimensioni sono state convalidate dai risultati numerici, opportunamente calibrati sulle precedenti esperienze sperimentali condotte sul prototipo TVT. Il TVT Pavilion rappresenta una soluzione in grado di superare le concorrenti strutture vitree dello stato dell'arte totalizzando una maggiore superficie coperta, grazie all'impiego del portale TVT $\gamma$ -bis di grande luce (20 metri) e il sistema di controventamento diffuso a pannelli ibridi vitrei precompressi. La smaterializzazione dell'involucro risulta pressoché totale. La standardizzazione delle lastre e degli elementi metallici, inoltre, facilita il processo costruttivo e la rapida sostituzione di elementi eventualmente danneggiati. I possibili impieghi sono assai vari: padiglioni espositivi e fieristici, coperture di beni storico-archeologici o di pregio e, in generale, involucri evoluti. Infatti, l'opportuna presenza di una lastra sacrificale nei pannelli laminati di tamponamento laterale e superiore consente di incapsulare nel sottile strato di *interlayer* moderni dispositivi per la produzione energetica, l'illuminazione o la comunicazione.

I limiti del precedente progetto pilota della Galleria Energetica sono stati definitivamente superati. Le migliorie apportate dal sistema costruttivo TVT $\gamma$ -bis, rispetto al predecessore TVT, hanno permesso di raggiungere maggiori luci con un aumento di trasparenza. Inoltre, rispetto alle barre pretese, la scelta dei trefoli incrementa la duttilità della struttura e la capacità di sopportare maggiori carichi, scontando per contro un aumento di deformazioni allo stato limite d'esercizio, tuttavia compreso entro limiti accettabili. La presenza metallica del trefolo, tramite una calibrata progettazione dei rapporti tra le parti strutturali, assicura la precedenza della crisi per snervamento rispetto al *buckling* del pannello o in generale alla rottura fragile del vetro, in accordo con la filosofia del FSD.

La soluzione angolare del portale, ammettendo varie inclinazioni del traverso rispetto al piedritto, consente grande libertà progettuale. L'impiego di pochi e semplici elementi strutturali innalza il livello di trasparenza di questa connessione.

Il sistema di controventamento longitudinale rappresenta uno degli elementi più innovativi del *TVT Pavilion*, assolvendo efficacemente e in modo diffuso al sostegno delle azioni orizzontali tramite la formazione di un meccanismo a bielle diagonali. A livello tecnologico, il tacco ne costituisce l'elemento chiave, esplicando una funzione analoga al nodo del telaio principale, ovvero trasmettere per contatto con il vetro dapprima le azioni della pretensione delle barre e successivamente delle reazioni del resto della struttura. La predisposizione di un appoggio intermedio tra i tacchi ha alleviato questi ultimi da eccessivi carichi verticali.

La strategia analitica multilivello adottata ha permesso, con modellazioni FEM locali e globali, di indagare ogni aspetto

della costruzione sotto vari scenari di carico e di vincolo, verificando agli SLU la sussistenza della gerarchia delle parti e della ridondanza strutturale. Nell'ambito degli SLE, resta tuttavia migliorabile la descrizione del comportamento deformativo, limitata dalle difficoltà computazionali conseguenti alla contemporanea presenza di non linearità geometriche e del contatto. La massa totale dell'opera è risultata assai contenuta, quindi l'azione dominante ai fini delle verifiche strutturali si è dimostrata essere il vento anziché il sisma, in analogia alle costruzioni in vetro di facciate e coperture. I risultati delle analisi confermano il verificarsi delle prestazioni strutturali attese nei riguardi della formazione di meccanismi di crisi controllabili e desiderati, nonché della buona diffusione delle compressioni nei pannelli di vetro che compon-

gono la struttura.

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

*Ing. Dario Maesano,*  
Ingegnere civile, Trevi SpA.

*Ing. Francesco Laccone,*  
Dottorando, DESTeC - Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, Sezione Strutture, Università di Pisa.

---

## BIBLIOGRAFIA

- [1] O'Callaghan J. (2005). *Adventures with Structural Glass*. Glass Structures 2001-2005. Glass Processing Days; Proc. intern. symp. Tampere: Eas Print Oy.
- [2] Baldassini, N., & Raynaud, J. (2010). Free-form, form finding and anisotropic grid shell. In *Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (50th. 2009. Valencia). Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures: Proceedings*. Editorial Universitat Politècnica de València.
- [3] Froli M., Masiello G. (2010). Una centrale solare trigenerativa alla corte del granduca di Toscana. In *Inossidabile* (p. 16). CENTRO INOX SERVIZI srl.
- [4] Kozłowski, M. (2012). Hybrid glass beams. Review of research projects and applications. *Arch. Civ. Eng. Environ*, 5, 53-62.
- [5] Jordão, S., Pinho, M., Martin, J. P., Santiago, A. and Neves, L. C. (2014), Behaviour of laminated glass beams reinforced with prestressed cables. *Steel Construction*, 7: 204-207. doi:10.1002/stco.201410027
- [6] Weller, B., & Engelmann, M. (2014). Deformation of Spannglass beams during post-tensioning. In *Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference* (pp. 285-294). CRC Press.
- [7] Louter, C., Cupa, J., & Lebet, J. P. (2014). Exploratory experimental investigations on post-tensioned structural glass beams. *Journal of Facade Design and Engineering*, 2(1-2), 3-18.
- [8] Belis, J., Louter, C., Verfaillie, K., Van Impe, R., & Callewaert, D. (2006). The effect of post-tensioning on the buckling behaviour of a glass T-beam. *International symposium on the application of architectural glass ISAAG 2006: conference proceedings* (pp. 129-136).
- [9] Bos, F. P., Veer, F. A., Hobbelman, G. J., & Louter, P. C. (2004). Stainless steel reinforced and post-tensioned glass beams. In *Proceedings of the 12th International Conference of Experimental Mechanics (ICEM12)*, Bari, Italy.
- [10] Haldimann M., Luible A., Overend M. (2008): "*Structural Use of Glass*". Zürich: IABSE.
- [11] Froli M., Lani L. (2010). *Glass Tensegrity Trusses*. *Structural Engineering International*, N°4.
- [12] Froli M., Mamone V. (2014). *A 12 meter long segmented, post-tensioned steel-glass beam (TVT Gamma)*. *Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference*. London: Louter, Bos & Belis (Eds.) ©2014 Taylor & Francis Group.
- [13] Froli, M., Masiello, G., Melis, A., Mamone, V., & Giammattei, M. (2014). *The Energy Gallery: a pilot project in Pisa*. *Engineered Transparency*. International Conference at Glasstec, Düsseldorf.
- [14] Maesano D. (2016). *Un involucro integralmente vitreo costruito mediante telai TVT di grande luce: studio di fattibilità*. Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile e delle Costruzioni Civili, relatore: Prof. Ing. Maurizio Froli. Pisa: Università di Pisa (online).
- [15] CNR DT 210 (2012). "*Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e il controllo di costruzioni con elementi strutturali di vetro*". Consiglio Nazionale delle Ricerche 2012.
- [16] NTC (2008). "*Norme tecniche per le costruzioni*" Ministero delle Infrastrutture, Min. Inf 14.