

E' solo alla fine degli anni ottanta che i metodi di tempera termica e chimica del vetro raggiungono il livello tecnologico necessario per conferire al vetro caratteristiche meccaniche che ne consentano un impiego in ambito strutturale.

La costruzione più rappresentativa, in quanto la prima nella quale il vetro è usato come vero e proprio materiale da costruzione, è quella delle Serres Bioclimatiques de La Villette, progettate da P. Rice, A. Fainsilber e I. Ritchie (RFR). In questo edificio la struttura metallica che sorregge la facciata scompare totalmente e ogni pannello di vetro è appeso a quello sovrastante. I carichi orizzontali sono invece assorbiti da un sistema di funi che irrigidiscono la cortina di vetro fuori dal suo piano. In questo progetto Peter Rice sviluppa ad hoc metodi di calcolo e di verifica adatti ad un materiale il cui comportamento meccanico è estremamente differente da quello dei materiali comunemente impiegati nell'ingegneria civile. E' noto infatti che accanto alla trasparenza, l'altra proprietà antonomastica del vetro è la fragilità che è caratterizzata, come noto, da rotture improvvise non accompagnate da deformazioni plastiche e dunque prive di alcun segno premonitore.

Si può anche dire che nel vetro, una volta inne-

TRAVI TRASPARENTI

Luci sempre più grandi: l'obiettivo si può raggiungere segmentando e presollecitando. In uno studio dell'Università di Pisa

Maurizio Froli, Leonardo Lani

scata, una fessura si propaga quasi istantaneamente senza apprezzabili possibilità di interruzione spontanea. Per questo motivo si capisce facilmente quale delicatezza e livello di difficoltà presenti la progettazione statica di una struttura in vetro, non solo sotto l'aspetto del calcolo, ma anche e soprattutto sotto quello del "Conceptual Structural Design". Per cercare di aggirare il pericolo di rotture improvvise e rovinose occorre infatti applicare in fase di ideazione di un sistema costruttivo in vetro i due principi di gerarchia e



Prototipo TVT β . Per aumentare il grado di stabilità flessor-torsionale, le due pareti parallele sono state allontanate tra loro (a 19 cm di distanza). I correnti superiori delle due pareti sono stati collegati con un controvento reticolare a croci di Sant'Andrea.

ridondanza stabilendo più "linee difensive" contro il rischio del collasso totale.

Attraverso il primo principio gli elementi resistenti del sistema devono essere disposti in ordine gerarchico, ossia in modo che la rottura di un ordine preceda necessariamente quella dell'ordine superiore. Il secondo principio stabilisce invece che ciascun ordine sia costituito dalla disposizione in parallelo di più elementi resistenti. Nel seguito viene proposta una classificazione, basata essenzialmente su principi statici, delle principali tipologie costruttive di travi in vetro effettivamente costruite fino ad oggi. La presentazione inizia da quelle che, a nostro avviso, presentano un minor grado di performance statica e termina con le ultime soluzioni, alcune delle quali già realizzate ma tuttora nella fase della incubazione sperimentale, altre appartenenti ancora alla sfera delle visioni future, sia pure fondate su base razionale.

Travi stratificate a parete continua

Negli anni novanta vengono progettate e realizzate le prime opere con membrature principali in vetro: a partire da questa epoca elementi strutturali quali travi e diaframmi controventanti vengono concepiti anche utilizzando questo materiale. Un esempio emblematico, ormai storico, è costituito dalla passerella pedonale progettata da Rob Nijssse nel 1993 che unisce due uffici a Rotterdam. La struttura è costituita da due travi portanti in vetro stratificato di lunghezza 3,2 metri che sorreggono un involucro completamente trasparente. Le travi portanti, alte 300 mm, sono realizzate con un vetro stratificato di tre lastre da 10 mm, mentre per il piano di calpestio è stato impiegato uno stratificato con due lastre da 15 mm

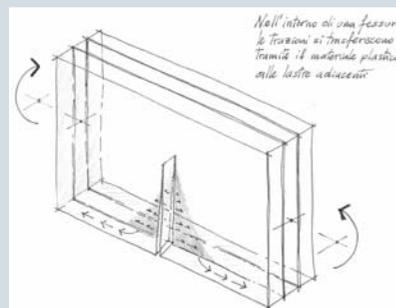
TIPOLOGIA DI TRAVE	DESCRIZIONE	LUCE
a	Travi stratificate a parete continua	$L < 5 \text{ m}$
b	Travi stratificate a parete discontinua	$L < 10 \text{ m}$
c	Travi stratificate a parete continua con armatura passiva	$L < 8 \text{ m}$
d	Travi stratificate a parete continua con armatura attiva	$L < 15 \text{ m}$
e	Travi stratificate a parete discontinua con armatura attiva: travi TVT	$L < 20 \text{ m}$

Travi stratificate a parete continua

A fianco, meccanismo resistente della trave in vetro stratificato con una lastra fessurata..

Sotto, Rob Nijsee, Passerella pedonale, Rotterdam 1993. La passerella unisce due uffici a Rotterdam. La struttura è costituita da due travi portanti in vetro stratificato di lunghezza 3,2

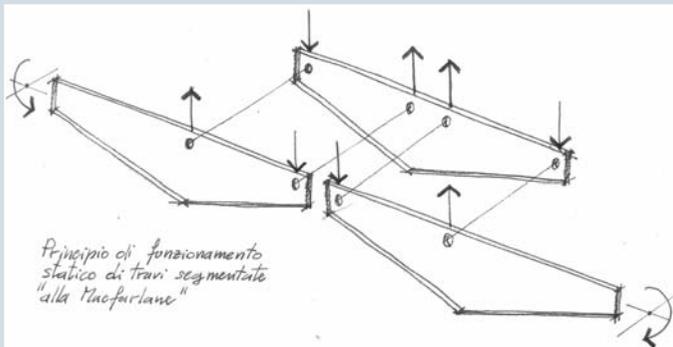
metri che sorreggono un involucro completamente trasparente. Le travi portanti, alte 300 mm, sono realizzate con un vetro stratificato di tre lastre da 10 mm, mentre per il piano di calpestio è stato impiegato uno stratificato con due lastre da 15 mm appoggiato alle membrature principali mediante silicone strutturale.



appoggiato alle membrature principali mediante silicone strutturale. Il tipo di vetro impiegato è Float ricotto, il quale, anche se molto meno resistente di quello temperato, in fase di rottura si frammenta in grandi elementi che consentono alle lastre stratificate di sviluppare un miglior comportamento post-critico. Sebbene la luce libera sia limitata, nella passerella di Nijssse è da apprezzare il notevole sforzo compiuto dai progettisti per utilizzare il vetro come unico materiale da costruzione limitando l'uso del metallo alle sole giunzioni tra gli elementi. In travi di questo tipo il principio di ridondanza è attuato attraverso la sola stratificazione delle tre lastre.

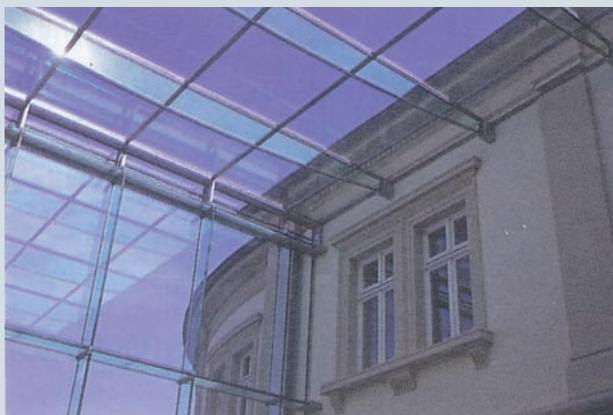
Travi stratificate a parete discontinua

A fianco, Dewhurst Macfarlane, Yurakucho Canopy, Tokyo 1997. Sotto, schema di funzionamento statico della Yurakucho Canopy, Tokyo 1997. La copertura vitrea della pensilina è sostenuta da tre nervature a sbalzo, aventi circa 10 metri di aggetto, le quali sono costituite dall'assemblaggio in serie ed in parallelo di diversi segmenti reciprocamente collegati con spinotti metallici.



Travi stratificate a parete continua con armatura passiva

Travi rinforzate con armatura passiva - Meccanismo di rottura. Si parla di armature passive quando il rinforzo, metallico o fibroso, è semplicemente reso solidale alla trave di vetro mediante incollaggi di forza.



Quando si verifica la formazione di una fessura in una lastra gli sforzi di trazione migrano da questa, attraverso il materiale plastico, sulle lastre contigue ancora integre garantendo l'equilibrio globale della struttura.

Il principio di gerarchia strutturale è assente in quanto la formazione di una prima fessura si verifica in una membratura principale; inoltre è chiaro che motivi di sicurezza rendono necessaria la sostituzione completa di una trave anche quando si è formata una sola fessura, sebbene un adeguato grado di sicurezza statica possa essere raggiunto anche da bassi tassi di sfruttamento del materiale. Con travi di questo tipo si ritiene che non possano essere superate luci di circa 5 metri raggiungendo, per contro, i massimi gradi di trasparenza. In considerazione della loro larga diffusione, anche come elementi irrigiditori di facciate, attorno a questa categoria di travi in vetro sono state condotte numerose campagne di studi teorici e sperimentali tra le quali presentano particolare rilievo le ricerche svolte presso l'ETH di Zurigo e l'RTWH di Aquisgrana.

Travi stratificate a parete discontinua

Un'altra costruzione "pionieristica" di concezione originale e nella quale gli elementi inflessi sono realizzati in vetro stratificato è la pensilina Yurakucho a Tokyo progettata nel 1997 da Dewhurst Macfarlane. La copertura vitrea della pensilina è sostenuta da tre nervature a sbalzo, aventi circa 10 metri di aggetto, le quali sono costituite dall'assemblaggio in serie ed in parallelo di diversi segmenti reciprocamente collegati con spinotti metallici.

In questa tipologia di travi in vetro, adottata recentemente anche da Ludwig & Weiler per superare 14 metri di luce nella copertura di una chiostra interna a Monaco di Baviera, l'idea nuova è in un certo senso quella di "preframmentare" la nervatura suddividendola in tante componenti distinte. Il principio di ridondanza viene perciò applicato su due diversi livelli: il primo è quello classico della stratificazione, il secondo consiste nella moltiplicazione degli elementi disposti in parallelo. Il principio della gerarchia strutturale può essere rintracciato solo in questa differenziazione ma, per effetto della isostaticità delle nervature, non sono presenti membrature di ordine inferiore deputate a subire il primo danneggiamento. Il problema di assicurare adeguate risorse post-critiche anche dopo il collasso di tutte le lame di vetro è stato però risolto introducendo nella zona

di incastro, in adiacenza alle lame di vetro, lastre di polycarbonato di identica geometria. La presenza di mezzi di unione puntuali (spinotti) ha imposto in questo caso l'impiego di vetro temperato per contrastare le concentrazioni di tensione che si verificano in corrispondenza dei fori. L'ubicazione della struttura in un contesto urbano soggetto a frequenti ed intensi terremoti ha richiesto infine la effettuazione di approfonditi studi specifici sull'effetto del sisma.

La segmentazione delle nervature consente senza eccessive difficoltà la sostituzione dei soli elementi eventualmente danneggiati, per contro riducendo alquanto il grado di trasparenza.

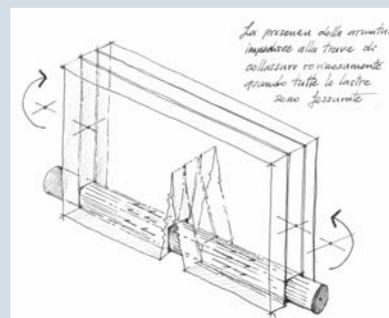
Travi stratificate a parete continua con armatura passiva o attiva

Per incrementare le riserve di sicurezza post-critiche delle travi di vetro a parete continua si può ricorrere alla introduzione di armature passive o attive in corrispondenza del bordo teso. Si parla di armature passive quando il rinforzo, metallico o fibroso, è semplicemente reso solidale alla trave di vetro mediante incollaggi di forza. Questa tecnica non è in grado di inibire in modo apprezzabile l'iniziazione della fessura e dunque lascia praticamente inalterate le risorse statiche di esercizio, mentre aumentano molto le risorse a rottura perchè, anche nel caso che tutte le lastre dello stratificato siano fessurate, l'armatura che aderisce ancora alle parti intatte è in grado, assieme a queste, di equilibrare le sollecitazioni esterne, in perfetta analogia con il cemento armato.

L'applicazione del principio di ridondanza è riscontrabile a livello della stratificazione mentre quello di gerarchia strutturale è riscontrabile nella presenza della "seconda linea difensiva" offerta dalla armatura. I vantaggi di questa tecnica risiedono nell'elevato grado di trasparenza mentre lo svantaggio consiste anche qui nel fatto che una volta fessurata una trave deve essere sostituita per intero. Presso diverse Università europee sono state svolte, o sono in corso, ricerche sperimentali e teoriche per testare le performances di travi appartenenti a questa categoria, variamente armate. Si citano tra le altre l'Università di Delft e, in Italia, l'Università di Firenze, il Politecnico di Milano, l'Università di Venezia che operano, assieme alla Università di Pisa e a quella di Parma, nell'ambito di un più vasto programma nazionale di ricerche finanziate dal Ministero della Ricerca coordinato dal primo degli scriventi. Definiamo "attiva" la armatura, metallica o fibrosa, applicata ad una trave di vetro se viene sottoposta a trazione facendo contrasto sulla trave di vetro stessa. Il principio è quello, molto noto, della presollecitazione delle travi in cemento armato o acciaio. La presollecitazione induce nella trave principalmente sforzi di compressione che si sommano beneficamente a quelli prodotti dal processo di tempera.

Travi stratificate a parete continua con armatura attiva

Definiamo "attiva" la armatura, metallica o fibrosa, applicata ad una trave di vetro se viene sottoposta a trazione facendo contrasto sulla trave di vetro stessa. Il principio è quello, molto noto, della presollecitazione delle travi in cemento armato o acciaio. La presollecitazione induce nella trave principalmente sforzi di compressione che si sommano beneficamente a quelli prodotti dal processo di tempera.



principio è quello, molto noto, della presollecitazione delle travi in cemento armato o acciaio. La presollecitazione induce nella trave principalmente sforzi di compressione che si sommano beneficamente a quelli prodotti dal processo di tempera. La armatura attiva offre gli stessi vantaggi di comportamento post-critico conferiti dalla armatura passiva ma a questi aggiunge la capacità di aumentare il livello di inibizione della formazione delle fessure innalzando quindi la soglia dei carichi di esercizio. Una applicazione concreta di questa tipologia di travi è quella delle terme di Badenweiler, in Germania, dove è stato realizzato un involucro interamente trasparente costituito da una parete vetrata e da una copertura sorretta da travi in vetro. Le travi sono a parete continua realizzate con vetro temperato, stratificato in tre lastre delle quali quelle esterne da 10 mm e quella interna da 15 mm. La luce di queste travi è pari a circa 6 metri, il massimo consentito per lastre monolitiche. La forma parabolica consente di seguire l'andamento del momento flettente per carico uniforme e di sfruttare al meglio la precompressione esercitata tramite una fune in acciaio inox disposta all'intradosso. Particolare attenzione è stata rivolta alla progettazione del sistema di ancoraggio del cavo realizzato con un incapsulamento metallico incollato alla trave con resina epossidica.

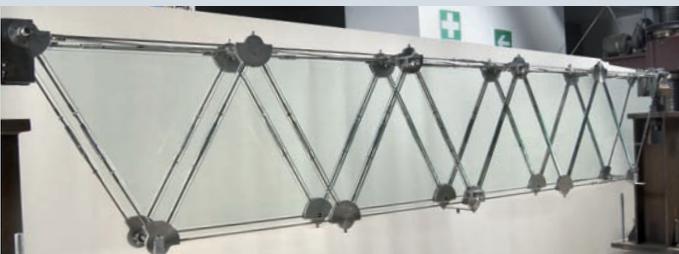
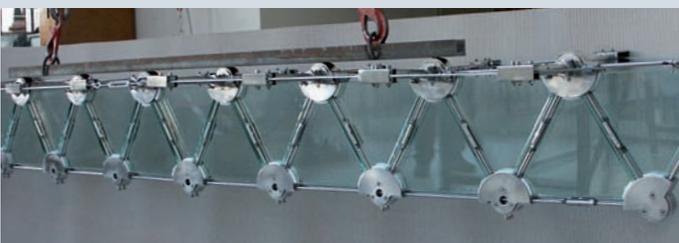
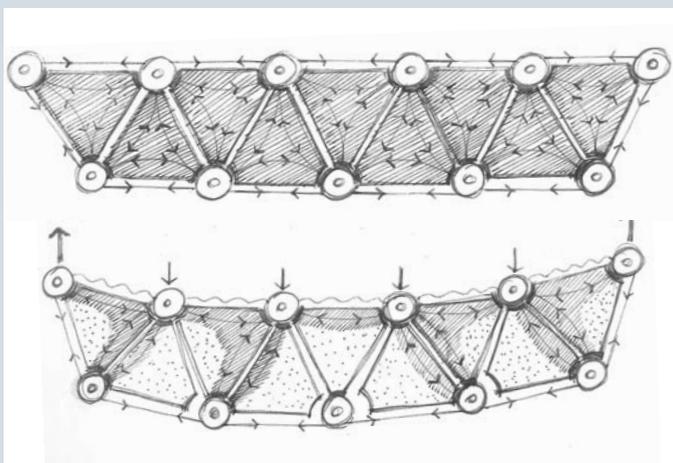
Travi stratificate a parete discontinua e armatura attiva: le Travi Vitree Tensegrity

Da alcuni anni il gruppo di ricerca guidato da Maurizio Froli conduce presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Pisa indagini teoriche e sperimentali nel campo delle strutture in vetro. Al momento attuale i lavori vertono principalmente attorno allo studio delle prestazioni statiche di una nuova tipologia di trave mista vetro-acciaio, denominata TVT (Trave Vitrea Tensegrity) che può esse-

Travi stratificate a parete discontinua con armatura attiva: travi TVT

A fianco, Nodi metallici in acciaio inox. Sotto, schema (fase di presollecitazione e decompressione) prototipo di TVT β .

La TVT assorbe, attraverso le lastre di vetro, gli sforzi di compressione; mentre gli sforzi di trazione vengono assorbiti in parte da tiranti metallici presollecitati.



Bibliografia

- R. Nijse, *Glass in Structures – Element, Concepts, Design*, Birkhäuser, 2003.
- R. Hess, *Glasträger*, HBT Bericht n° 20, Institut für Hochbautechnik, 2000.
- K. Blank, W. Laufs, G. Sedlacek, *Glas im konstruktiven Ingenieurbau*, Ernst & Sohn, Berlin, 2003.
- C. Louter, F. Veer, *Large Span Reinforced Glass Beams, Prototype Research*, IASS, Venice, 2007.
- Programma di ricerca scientifica di Rilevante Importanza Nazionale (PRIN 2005) su Affidabilità di elementi in vetro strutturale. Indagini teoriche e sperimentali sulla risposta termo-meccanica di strutture trasparenti di tipo innovativo.
- M. Froli, *Struttura di trave composita. Brevetto PI/2006/a/000017*. Università di Pisa, Trave Vitrea Tensegity (TVT), 2006.
- G. Royer Carfagni G., M. Silvestri, *A Proposal for an Arch Footbridge in Venice Made of Structural Glass Masonry*, Engineering Structures, Vol. 29, ISSUE 11, nov. 2007.

re classificata come una trave di vetro a parete discontinua e armatura attiva. La concezione inventiva, depositata dal primo autore per la Università di Pisa è quella di fare assorbire alle lastre di vetro quasi unicamente sforzi di compressione – verso i quali il vetro è molto resistente – mentre gli sforzi di trazione vengono assorbiti in fase di esercizio principalmente per decompressione del vetro e, una volta superata una certa soglia, da tiranti metallici presollecitati. Questa linea di travi è progettata in modo da raggiungere in fase di esercizio carichi elevati con piccole deformazioni e al contrario di sviluppare in fase post-rottura una considerevole duttilità, requisito necessario per le applicazioni in zona sismica. Dal punto di vista costruttivo le travi TVT sono costituite dall'assemblaggio, libero da foratura, di due piani paralleli di pannelli triangolari in vetro attraverso un doppio sistema di barre pretese (o cavi) in acciaio (inox AISI 316) che confluiscono insieme ai vertici degli elementi vitrei in nodi di acciaio. I pannelli sono composti da due strati di vetro temperati chimicamente e laminati mediante uno strato di materiale plastico. I nodi metallici presentano degli alloggiamenti circolari che accolgono, per il tramite di un materiale soffice di interposizione, i vertici arrotondati dei triangoli di vetro. Sempre nei nodi sono praticati dei fori filettati nei quali vengono avvitate le estremità dei tiranti di acciaio. Sottoponendo i tiranti a trazione, i pannelli di vetro vengono spinti in corrispondenza dei loro vertici contro i nodi di acciaio che reagiscono imprimendo ai pannelli forze di compressione agenti quasi sulla bisettrice dei vertici e suscitando quindi nei pannelli uno stato di compressione benefico pressoché isotropo.

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

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

Prof. ing. Maurizio Froli, Dr. Ing. Leonardo Lani Dipartimento di Ingegneria Strutturale Università di Pisa.

Segue a pagina 522

Travi trasparenti

Maurizio Froli

Leonardo Lani

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

Contemporaneamente l'assorbimento delle trazioni viene interamente trasferito ai tiranti metallici. Nel campo delle travi di vetro riteniamo che gli sviluppi futuri riguardino soprattutto la sfida delle grandi luci.

Questo obiettivo è stato in parte già raggiunto dalle travi segmentate di Macfarlane e di Ludwig&Weiler ma riteniamo che luci maggiori, associate anche ad adeguate e più grandi risorse di sicurezza, possano essere raggiunte solo mediante la tecnica della segmentazione delle travi e della loro presollecitazione, ossia con sistemi costruttivi del tipo delle travi TVT.

Verso questo traguardo certamente la forma complessiva donata alla struttura può fornire un contributo positivo.

In altre parole, tenendo presente la enorme resistenza del vetro a compressione, sembra logico aspettarsi di poter incrementare la portata di travi in vetro conferendo loro una forma arcuata il che implica ovviamente il sommarsi alle compressioni generate dalla presollecitazione e dai processi di tempera, quella indotta dal peso stesso della struttura e dai carichi applicati.

Studi teorici sono già stati condotti in questa direzione ma volti alla realizzazione di veri e propri archi massicci costruiti con mattoncini in vetro.

A nostro avviso è preferibile non rinunciare alla relativa leggerezza della costruzione limitando al massimo la quantità di vetro da impiegare.