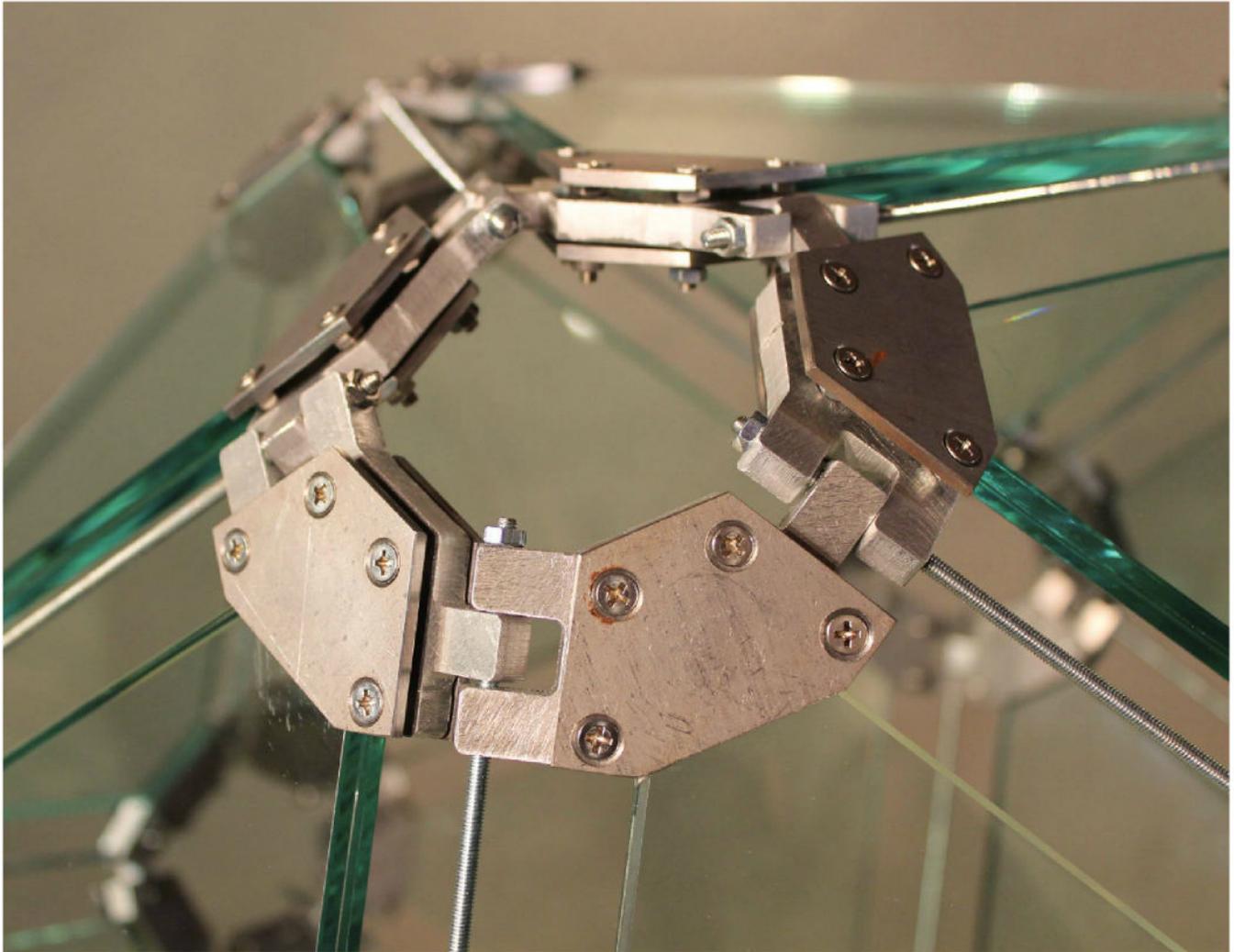


ALTISSIME ...



Nodo Hexmak Hexagonal Adaptive Multifunction Knot. Composto da tre fino a sei settori identici con un angolo di apertura pari a 60° , come nel sistema TVT, ciascun settore è conformato in modo da contenere il vertice di un pannello triangolare di vetro, impedendo completamente tutte le componenti di moto relativo tra nodo e pannello.

TRASPARENZE

VETRO (IBRIDO) STRUTTURALE

Travi, colonne, grandi facciate sospese, coperture a guscio, quasi tutto è possibile, "contaminando" il vetro con materiali duttili, metallici e sintetici, che ne aumentino la sicurezza. D'obbligo calcoli accurati e .. prudenza. Con buona pace degli architetti

di Maurizio Froli, Francesco Laccone

Nell'ultimo decennio il vetro si è definitivamente affermato come materiale utilizzabile anche per impieghi strutturali non secondari uscendo quindi del tutto dalla fase iniziale, pionieristica e a tratti anche alquanto avventurosa, nella quale impieghi di questo tipo hanno potuto attuarsi solo grazie allo straordinario intuito e alle capacità di alcuni progettisti pur obiettivamente in assenza di un adeguato livello di conoscenze scientifiche e tecnologiche. Oggi al contrario è possibile accedere, dal punto di vista tecnologico, ad un vastissimo repertorio di realizzazioni esemplari e dal punto di vista scientifico si può attingere ai risultati di sistematiche campagne di indagini teoriche e sperimentali finalizzate ad approfondire le conoscenze attorno al materiale base e al comportamento meccanico di strutture in vetro di grande scala. Con il progredire delle conoscenze e sotto la costante richiesta di trasparenza proveniente dal mondo architettonico, l'uso strutturale del vetro ha oltrepassato dunque i confini che lo relegavano alle applicazioni di modesto impegno statico come finestrature, parapetti, pianerottoli etc. ed ha progressivamente interessato la realizzazione di elementi strutturali primari quali travi, colonne, grandi



Modelli SVT: (a) piramide; (b) icosaedro; (c) tetraedica

VOCABOLARIO

SLU

Stato Limite Ultimo (di collasso globale)

SLE

Stato Limite di Esercizio (di prima fessurazione e di deformazione).

FSD FAIL SAFE DESIGN

Principio della ridondanza: impone che due o più componenti gemelli siano disposti in parallelo in modo che, nell'eventualità del collasso parziale o completo di un componente, gli altri siano ancora in grado di esplicare la funzione portante con un livello di sicurezza ancora accettabile. Principio di gerarchia strutturale: garantisce un comportamento complessivamente duttile attraverso una successione prestabilita di crisi parziali degli elementi componenti.

TVT TRAVI VITREE TENSEGRITY

Strutture piane ottenute per composizione modulare su schema Warren di pannelli triangolari equilateri in vetro stratificato si tratta di un prodotto da costruzione di vetro strutturale pre-compresso e acciaio.

SVT SOLIDI VITREI TENSEGRITY

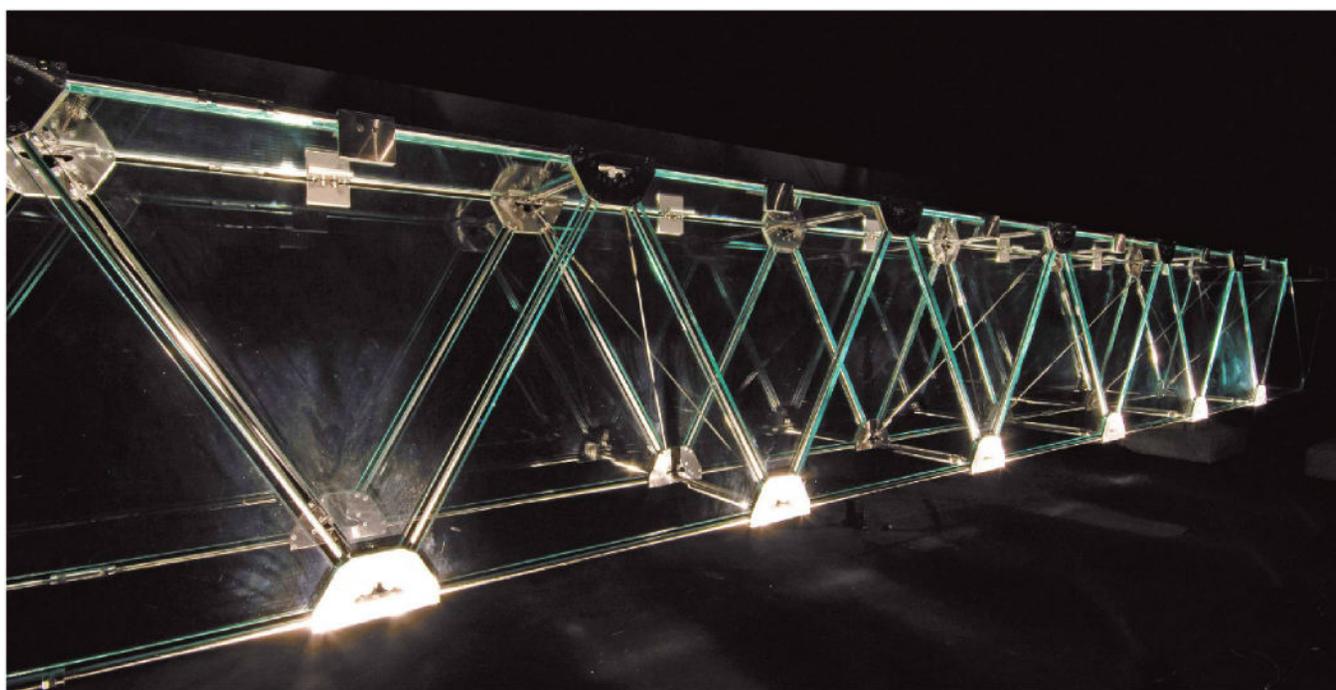
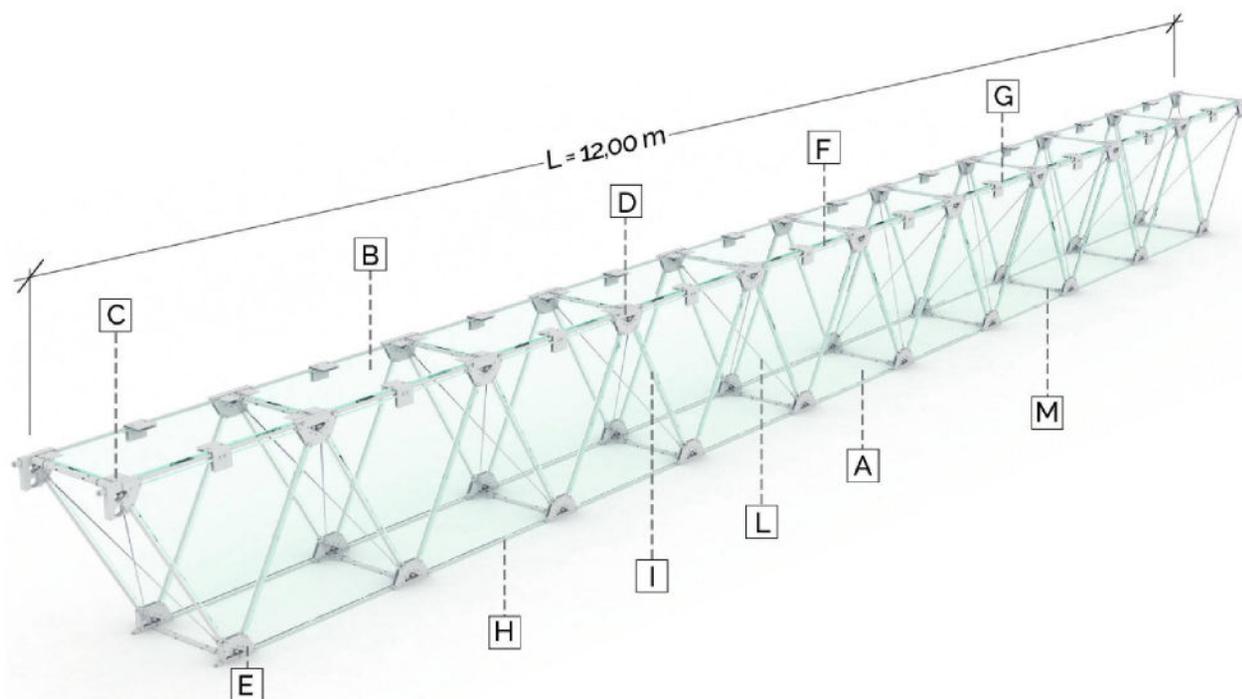
Nel sistema SVT i pannelli possono essere collegati tra loro in modo da ottenere qualsiasi superficie spaziale poliedrica a facce triangolari equilateri. La mutua aggregazione dei pannelli triangolari equilateri è ottenuta attraverso la tecnica della pre-compressione reciproca degli elementi operata mediante cavi e barre metalliche o anche fibre artificiali poste in pre-trazione.

facciate sospese, coperture a guscio ecc. Il livello di maturità raggiunto da questo specifico settore è dimostrato anche dalla comparsa in vari Paesi industrializzati di normative e raccomandazioni tecniche sull'impiego del Vetro Strutturale in ambito architettonico. Tuttavia, a

causa della sua intrinseca e altamente aleatoria fragilità, il vetro rimane ancora un materiale estremamente problematico e pericoloso per impieghi strutturali impegnativi. Anche se ormai si dispone di metodi teorici capaci di prevedere con buona affidabilità il tempo residuo

PROTOTIPO TVT GAMMA:

A) Pannello vitreo triangolare equilatero di parete (lato 1173,8 mm, spessore 10+1,52+10 mm); B) Pannello vitreo quadrangolare (1126x524 mm, spessore 10+1,52+10 mm); C) Nodo di estremità superiore e di appoggio; D) Nodo intermedio quadrivalente; E) Nodo di estremità inferiore; F) Barra longitudinale superiore pretesa; G) Nodo di fissaggio intermedio; H) Barra longitudinale inferiore pretesa; I) Barra diagonale pretesa; L) Diaframma torsionale preteso; M) Collegamento trasversale.



che precede la fessurazione di un elemento strutturale in vetro sottoposto ad assegnate storie di carico non è prudente pensare che il mero soddisfacimento di verifiche teoriche di resistenza e stabilità basti a garantire in una grande struttura vitrea livelli di sicurezza sufficienti nei confronti di eventi critici accidentali impossibili da prevedere e controllare esclusivamente mediante procedimenti teorici.

SICUREZZA IN PRIMO PIANO

Un adeguato margine di sicurezza nei confronti dello Stato Limite Ultimo (SLU) di collasso globale può essere infatti raggiunto solo attraverso oculate scelte progettuali in modo che, anche nella eventualità di crisi per cause accidentali di uno o più elementi vitrei componenti, la struttura globalmente non collassi ma anzi mantenga sufficienti separati ridotti margini di sicurezza per la salvaguardia delle vite umane. Questo risultato è ottenibile esclusivamente sostituendo l'idea utopistica e avulsa dalla realtà fisica di raggiungere ad ogni costo la trasparenza assoluta con l'idea di porre il vetro in associazione simbiotica con materiali duttili, metallici o sintetici,

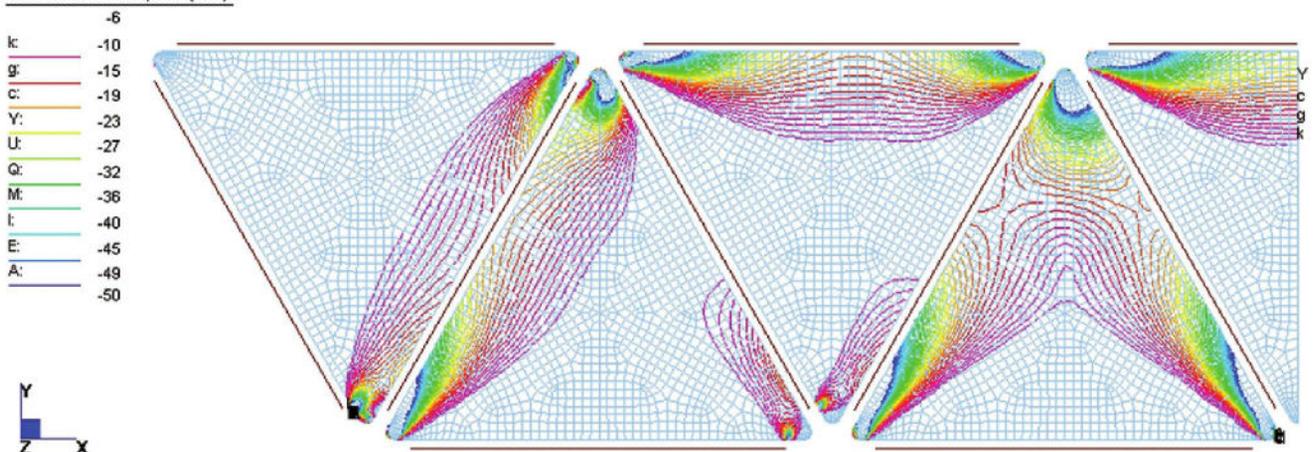


New Cube for 5th Avenue Apple Store, New York, ricostruito nel 2011. Si tratta di uno dei primi esempi di struttura di vetro con lastre laminate inflesse fuori del loro piano medio, destinate a orizzontamenti calpestabili e pareti di facciate continue. Le nervature orizzontali e verticali anch'esse laminate ma inflesse nel loro piano medio, sono spesso utilizzate per sostenere e irrigidire le precedenti superfici (fotografia courtesy Eckersley O' Callaghan engineers)

in modo da realizzare strutture ibride nelle quali il grado di trasparenza è ancora elevatissimo ma non assoluto perché fisicamente irraggiungibile con i mezzi di oggi. Inoltre, un ulteriore problema che le strutture in vetro di grande luce libera presentano ma che risulta generalmente trascurato è la sicurezza nei con-

fronti dello Stato Limite di Esercizio (SLE) di prima fessurazione. Infatti, in una grande struttura vitrea anche il solo manifestarsi di una singola fessura in un elemento componente suscita conseguenze economiche paragonabili a quelle di un collasso totale perché la fessurazione implica necessariamente la completa

Plate Stress:22 Mid plane (MPa)



rimozione e sostituzione dell'intera struttura non essendo pensabile, per ovvi motivi psicologici ed estetici, di mantenere ad esempio in opera una trave in vetro parzialmente fessurata, anche se lontana dal collasso finale. Nell'articolo verranno dapprima esaminate in sintesi le strategie fino ad oggi adottate per ottenere strutture vitree di grande impegno statico, quindi verrà proposto un concetto statico alternativo attraverso il quale raggiungere grandi luci libere, sia orizzontali che verticali, con strutture in vetro ben performanti sia nei riguardi dello SLU di collasso finale che dello SLE di prima fessurazione.

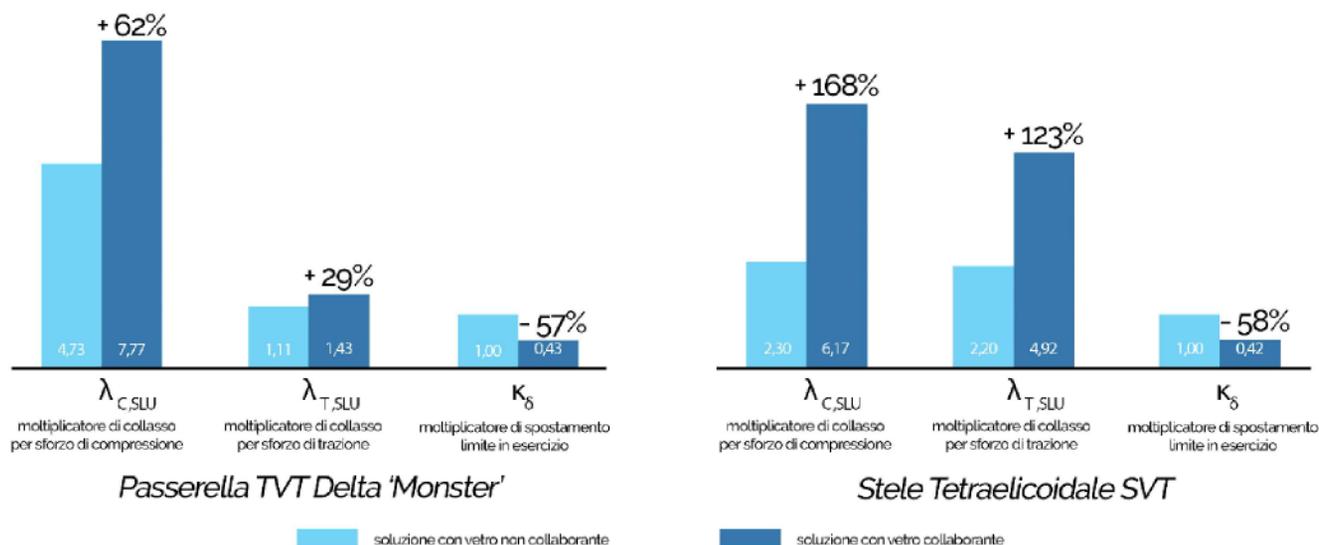
STRATEGIE COSTRUTTIVE DI SALVAGUARDIA CONTRO LO STATO LIMITE ULTIMO FAIL SAFE DESIGN

L'obiettivo di ottenere una struttura vitrea con un buon comportamento post-fessurativo è raggiungibile se la concezione strutturale rispetta i due principi di ridondanza e di gerarchia strutturale del Fail Safe Design (FSD). Il principio di ridondanza impone che due o più com-

ponenti gemelli siano disposti in parallelo in modo che nella eventualità del collasso parziale o completo di un componente gli altri siano ancora in grado di esplicare la funzione portante con un livello di sicurezza inferiore ma ancora accettabile. Il rispetto del principio di gerarchia delle resistenze permette invece di garantire un comportamento complessivamente duttile della struttura attraverso una successione prestabilita di crisi parziali degli elementi componenti. In tale successione la crisi degli elementi duttili deve precedere quella degli elementi fragili i quali sono dimensionati in modo da risultare sovra-resistenti rispetto agli elementi duttili.

Le prime tipologie di strutture di vetro di un certo impegno sono state le lastre laminate inflesse fuori del loro piano medio, destinate a orizzontamenti calpestabili e pareti di facciate continue. Subito dopo sono apparse le nervature orizzontali e verticali anch'esse laminate ma inflesse nel loro piano medio, spesso utilizzate per sostenere e irrigidire le precedenti superfici (immagine New Cube Apple Store, in alto nella pagina precedente). In questi

elementi la laminazione di due o più lastre gemelle soddisfa il principio di ridondanza ma non quello di gerarchia delle resistenze. Infatti, se una delle lastre componenti si fessura, le altre lastre ad essa solidali consentono ancora il flusso in by pass delle trazioni evitando il collasso globale ma non è possibile stabilire a priori un ordine di manifestazione delle crisi tra le varie lastre e non è ovviamente possibile pilotare la rottura finale verso la duttilità essendo tutti gli elementi resistenti costituiti da fragile vetro. Anzi, la eventualità che tutte le lastre del sandwich si fessurino nello stesso punto, anche se probabilisticamente remota, non può essere esclusa. Nelle travi di vetro laminate un notevole progresso è stato raggiunto introducendo il concetto di ibridismo della costruzione attuato nelle prime applicazioni mediante l'incollaggio, spesso già in fase di laminazione, di un'armatura metallica al lembo teso (travi di vetro con armatura passiva). Come nel cemento armato, in caso di fessurazione anche estesa del vetro l'armatura tiene uniti i lembi delle fessure, aumenta il carico di collasso della trave e



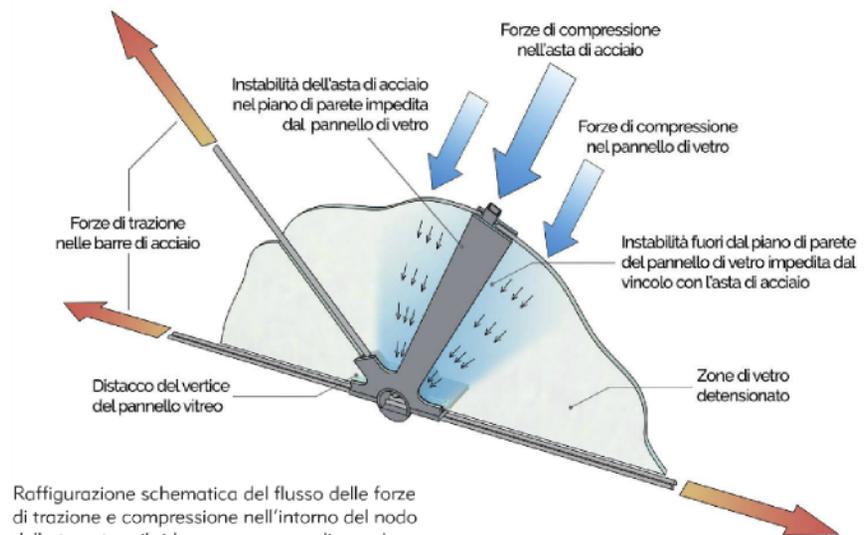
Confronto tra i dati numerici ottenuti dalle soluzioni con pannelli vitrei collaboranti e non, rispettivamente per i progetti di passerella TVT Delta "Monster" a sinistra e stele tetraelicoidale SVT a destra.

scongiora il pericolo di un collasso globale improvviso. Dosando opportunamente l'area della sezione metallica rispetto a quella vitrea è possibile far sì che lo snervamento dell'armatura preceda la crisi per compressione del vetro nel rispetto del principio di gerarchia del FSD e garantendo quindi anche modalità di rottura duttili.

COMPRESSIONE ENDOGENA ED ESOGENA

Un ulteriore grande progresso verso il raggiungimento di grandi luci è stato ottenuto introducendo nelle sezioni trasversali vitree tensioni di compressione aggiuntive che si sovrappongono alle eventuali autotensioni da tempera del materiale base e che inibiscono ulteriormente la iniziazione delle fessure e la loro propagazione. Queste compressioni aggiuntive possono essere endogene ed esogene: le prime sorgono per motivi morfologici a partire dagli effetti del peso proprio come tipicamente nelle strutture piane ad arco o spaziali a guscio. Le seconde sono generate da cause esterne artificiali quali usualmente le precompressioni attuate nelle travi di

FAIL SAFE DESIGN E STRUTTURE IBRIDE SEGMENTATE E RICOMPOSTE IN UN EQUILIBRIO DI COMPRESSIONI E PRE-TRAZIONI DEI CAVI: QUESTA LA "FORMULA ALTISSIME TRASPARENZE"



Raffigurazione schematica del flusso delle forze di trazione e compressione nell'intorno del nodo della travatura ibrida precompressa di grande luce, modello TVT Delta "Monster"

vetro con armatura attiva mediante cavi metallici o sintetici scorrevoli e post-tesi.

CONTINUITÀ O SEGMENTAZIONE?

Livelli di resistenza e rigidità adeguati all'impiego sono i due requisiti più importanti di un qualsiasi organismo strutturale. E' dunque perfettamente comprensibile che anche nelle strutture in vetro e specialmente nelle travi vitree di luce notevole i progettisti abbiano cercato con ogni mezzo di ottenere il più elevato grado di monoliticità e continuità strutturale possibile al fine di massimizzarne la rigidità essenzialmente attraverso la tecnica della laminazione, come testimoniato dalle travi di grande luce laminate a giunti sfalsati il cui impiego per realizzare travi vitree di grande luce risulta però limitato per le seguenti ragioni:

- Una prima limitazione è costituita dalla lunghezza commerciale delle lastre vitree componenti che normalmente non eccede 6 metri. E' vero che si può superare questo limite con una tecnica simile a quella

usata nel legno lamellare laminando in tre o più strati lastre disposte in serie con giunti, come detto, sfalsati trasversalmente ma occorrono autoclavi di dimensioni non usuali.

- La necessità di avere una laminazione ad almeno quattro strati implica che il peso proprio strutturale sia una frazione importante del carico limite ultimo. In ogni caso, per garantire sufficiente resistenza alla fessurazione e adeguate riserve post-fessurative, è necessario ricorrere come accennato ad armature passive. Tuttavia, volendo far sì che il comportamento post-critico sia duttile, non sarà possibile introdurre percentuali molto elevate di armatura. L'incremento del modulo di resistenza della sezione mista omogeneizzata prodotto in Fase I non fessurata dalla presenza della armatura sarà quindi modesto. Altrettanto modesti e necessariamente decrescenti con l'aumentare della luce risulteranno anche il carico esterno di prima fessurazione e quello di collasso rapportati al peso proprio strutturale.

- Una ulteriore severa limitazione è infine quella, già menzionata



PER RIDURRE
IL RISCHIO DI
COLLASSO,
GARANTENDO LA
SALVAGUARDIA
DELLE VITE UMANE,
È NECESSARIO
ABBANDONARE
L'IDEA UTOPISTICA
E AVULSA DALLA
REALTÀ FISICA DI
RAGGIUNGERE A
OGNI COSTO LA
TRASPARENZA
ASSOLUTA.
IL VETRO VA IBRIDATO
CON ALTRI MATERIALI
A GARANZIA DELLA
SICUREZZA

Progetto di una stela tetraedica
alta 27 m. realizzata in sistema
SVT. (Struct. Concept Design:
M. Froli. Struct. Calculations and
Drawings: F. Laccione)

nell'introduzione, dovuta al fatto che l'intera trave deve essere rimossa e sostituita anche se una singola fessura compare in una delle lastre componenti rese tra loro inseparabili dalla laminazione.

La pre-sollecitazione dell'armatura incrementa il rapporto tra carico utile e peso strutturale ma non sarà mai possibile evitare che per cause accidentali o per combinazioni di carico difficilmente prevedibili si formi una fessura anche in uno solo degli elementi componenti rendendo inevitabile la rimozione di tutto il manufatto con conseguenze economiche proporzionali alla dimensione della struttura. Anche questa ultima limitazione può essere però superata associando all'idea di ibridismo e auto- o pre-sollecitazione quella di segmentazione della componente vitrea, ossia adottando una concezione strutturale diametralmente opposta a quella della continuità appena delineata e fino ad oggi universalmente accettata e adottata.

TRAVI VITREE TENSEGRITY (TVT): MODULARI, SEGMENTATE, PRECOMPRESSE

Le prove sperimentali condotte con successo sui prototipi TVT Beta (L=3330 mm) e TVT Gamma (L=12000 mm) di Travi Vitree Tensegrity, hanno dimostrato che si possono raggiungere in sicurezza

luci considerevoli con travi di vetro leggere se si abbandona paradossalmente il concetto di monoliticità e si adotta quello opposto di segmentazione suddividendo la trave in tanti pannelli di vetro dotati di dimensioni relativamente contenute e conveniente geometria modulare, interconnessi reciprocamente solo mediante presollecitazione di cavi o barre duttili. Si può in altre parole dire che la frammentazione causata dalla fessurazione delle travi in vetro a parete continua al raggiungimento del collasso è stata anticipata nelle TVT e disciplinata in una suddivisione regolare di pannelli triangoli equilateri identici disposti secondo uno schema Warren. I concetti strutturali fondamentali ispiratori le TVT sono perciò l'ibridismo, la segmentazione e la presollecitazione. A livello complessivo le TVT si compongono di due anime parallele opportunamente distanziate tra loro e composte da pannelli triangolari equilateri in vetro ([A], immagine a pag. 10). Il collegamento trasversale tra i due ordini paralleli è ottenuto mediante profili tubolari di acciaio [M] avvitati al centro dei nodi metallici [C, D, E]. La piattabanda superiore compressa è composta da un insieme di pannelli vitrei rettangolari [B] disposti ortogonalmente alle anime ed aventi oltre alla funzione di aumentare l'area della zona compressa, anche quel-

GLI ARCHITETTI CHIEDONO UN'IDEALE INTEGRALE SMATERIALIZZAZIONE DI STRUTTURE CON GRANDI LUCI E ALTEZZE LIBERE. E L'INGEGNERIA PUÒ FARCELA CON L'USO STRUTTURALE DEL VETRO

la di controvento flessio-torsionale orizzontale. Nelle TVT la ridondanza è attuata a livello locale grazie alla laminazione dei singoli pannelli mediante due lastre di vetro HSG e a livello globale della trave medesima grazie ai due ordini paralleli di pareti d'anima. Il dimensionamento allo SLU delle componenti è avvenuto in modo che la crisi per snervamento delle parti in acciaio preceda sempre quella per compressione delle parti in vetro, generando così nell'intera struttura un comportamento al collasso globalmente duttile. Allo SLE il sorgere di nocive trazioni nel vetro, che potrebbero provocarne la fessurazione, viene impedito dalla decompressione dei vertici dei pannelli e dal successivo



Progetto di una passerella pedonale di luce 30 m realizzata mediante il sistema TVT Gamma "Monster".
(Struct. Concept Design: M. Froli. Struct. Calculations and Drawings: A. Natali)



distacco dai loro alloggiamenti nei nodi metallici. Al crescere dei carichi esterni la decompressione si propaga dalla mezzera verso gli appoggi e lo schema statico della trave muta gradualmente trasformandosi da ultimo in quello di una travatura reticolare nella quale le parti compresse sono in vetro e le parti tese in acciaio. In questo modo i due materiali vengono chiamati a svolgere i ruoli rispettivamente per loro più congeniali ed il vetro, essendo in pratica solo compresso, risulta idealmente indenne da fessurazione. Questo accorgimento costituisce la principale caratteristica di originalità del sistema TVT e la ragione essenziale dell'elevata efficienza statica esibita dai prototipi Beta e Gamma nel corso delle prove sperimentali.

UNA ESTENSIONE SPAZIALE DEL CONCETTO TVT: I SOLIDI VITREI TENSEGRITY (SVT)

L'estensione spaziale del concetto meccanico e formale ispiratore delle Travi Vitree Tensegrity ha condotto alla ideazione del sistema costruttivo Solidi Vitrei Tensegrity

(SVT). Infatti, mentre le TVT sono strutture piane ottenute per composizione modulare su schema Warren di pannelli triangolari equilateri in vetro stratificato, nel sistema SVT i pannelli possono essere collegati tra loro in modo da ottenere qualsiasi superficie spaziale poliedrica a facce triangolari equilateri.

La mutua aggregazione dei pannelli triangolari equilateri è ottenuta anche in questo caso attraverso la tecnica della precompressione reciproca degli elementi operata mediante cavi e barre metalliche o anche fibre artificiali poste in pre-trazione.

Sia i vertici dei pannelli triangolari che formano i tetraedri che i cavi o le barre trovano alloggio in nodi di acciaio o lega di alluminio di nuova concezione denominati Hexamak (Hexagonal Adaptive Multifunction Knot, brevetto MI2013A001496 del 10/09/2013). Il nodo Hexamak è composto da tre fino a sei settori identici con un angolo di apertura pari a 60°. Come nel sistema TVT, ciascun settore è conformato in modo da contenere il vertice di un pannello triangolare di vetro, impedendo completamente tutte le com-

ponenti di moto relativo tra nodo e pannello ad esclusione della possibilità, per il pannello, di traslare lungo la bisettrice dell'angolo al vertice nel senso dello sfilamento (figura a pag. 8). Mentre nel sistema TVT i nodi erano costituiti da settori rigidamente interconnessi, nel sistema SVT i settori sono mutuamente rotabili per mezzo di cerniere cilindriche aventi come assi di rotazione gli spigoli ideali della generica superficie poliedrica.

Il perno di queste cerniere cilindriche è costituito dalle stesse barre o cavi di presollecitazione. In particolare è possibile ottenere una larga varietà di solidi completamente trasparenti dotati di geometrie complesse come ad esempio spirali e tori tetraedrici, strutture turriformi variamente sfaccettate, piramidi tetraedriche etc. (immagine a pag. 9). Si osserva infine che il sistema TVT delle Travi Vitree Tensegrity può essere considerato un semplice sottoinsieme del più generale sistema SVT dei Solidi Vitrei Tensegrity.

STRUTTURE IBRIDE COMPRESSE CON TECNICA MISTA ENDO- ESOGENA

Il vetro esibisce una resistenza a compressione pura che si aggira attorno a 10.000 daN/cm². Pertanto, la capacità portante e la affidabilità di strutture ibride vengono elevate moltissimo se si riesce, attraverso dispositivi costruttivi del tipo visto in precedenza, ad affidare a questo materiale in modo pressoché esclusivo l'assorbimento delle tensioni di compressione sottraendolo al contempo alle nocive trazioni. Tuttavia, volendo realizzare strutture nelle quali il peso proprio sia una frazione piccola del carico utile portato, gli spessori delle lastre di vetro devono essere molto contenuti e di conseguenza la snellezza delle parti compresse risulta molto elevata con

valori che si aggirano attorno a 300-350. La modalità di crisi di questi elementi risulta quindi non tanto lo schiacciamento semplice quanto la ben più insidiosa instabilità (*buckling*).

Per evitare anche questo pericolo occorre allora limitare le lunghezze di libera inflessione vincolando opportunamente in modo puntuale o continuo le parti compresse, sia tra di loro che agli elementi metallici adiacenti.

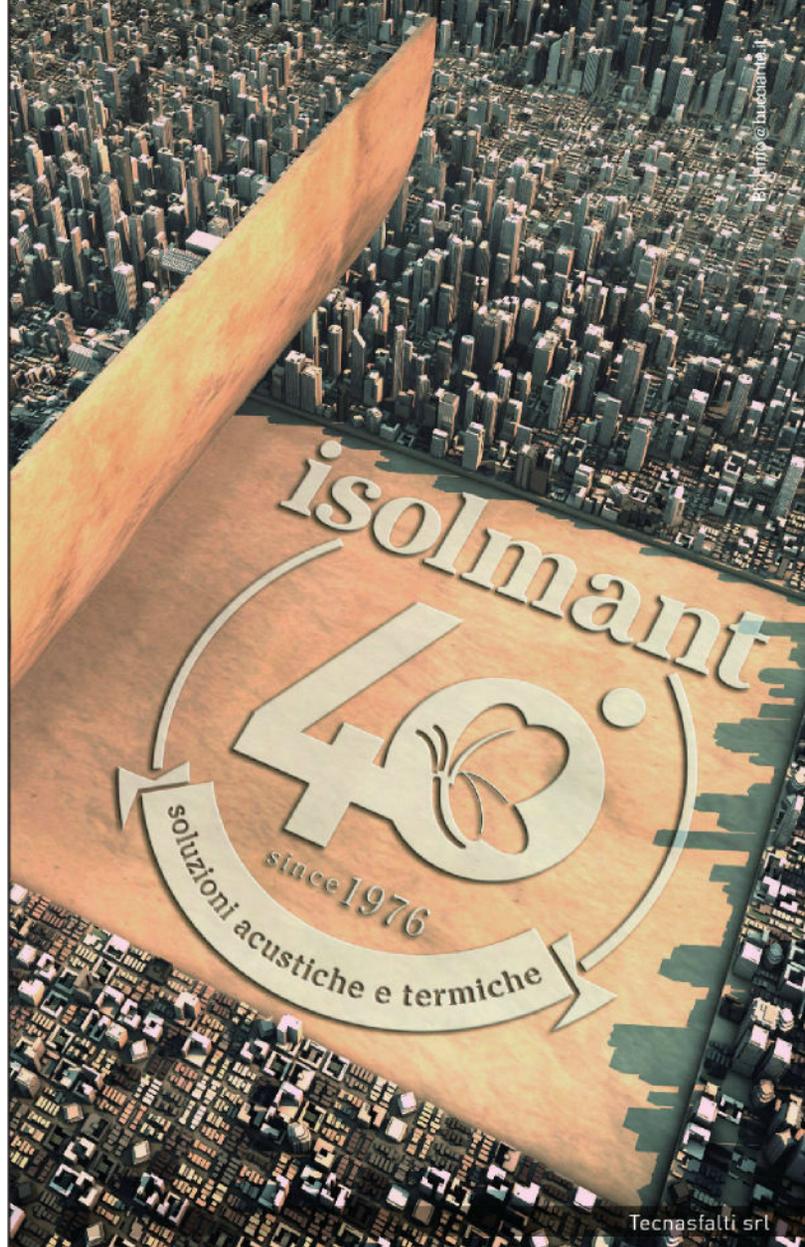
Se si esamina ad esempio il prototipo TVT Gamma, i lati compressi dei pannelli vitrei triangolari posti al lembo superiore sono vincolati al centro con le lastre rettangolari adiacenti, che costituiscono la piattabanda superiore compressa, attraverso idonei fissaggi a ganascia che includono anche le barre di precompressione superiori (v. nodo [G] a pag. 10).

Con questo accorgimento i punti di mezzo dei due ordini di lastre sono mutuamente impediti di sbandare fuori piano, pertanto la snellezza delle lastre viene dimezzata e la tensione critica a carico di punta quadruplicata. È evidente che aumentando il numero dei vincoli reciproci in funzione della intensità delle compressioni si riesce ad uniformare lungo l'asse della trave le riserve di stabilità dei pannelli di vetro. Procedendo per questa strada si giunge all'uniforme reciproco vincolamento dei bordi vitrei compressi che a quel punto assumono la funzione di veri e propri corridoi di flusso delle compressioni (schema a pag. 13).

Se il vincolo stabilizzante comprende anche parti metalliche adiacenti si può passare alla formazione locale di vere e proprie aste miste vetro-metallo compresse in parallelo e reciprocamente stabilizzate, come proposto in per la realizzazione di colonne miste vetro-acciaio di elevata portanza.

Lungo questa strada i sistemi TVT e SVT compiono un ulteriore passo evolutivo che consente loro di raggiungere in sicurezza luci orizzontali di 30-35 metri e slanci verticali di 25-30 metri come confermano, per ora solo sul piano teorico, simulazioni numeriche sviluppate di recente i cui risultati sono riassunti nella tabella di pag.12.

Nelle immagini nelle due pagine precedenti vengono rispettivamente mostrate le viste renderizzate dei progetti di una passerella pedonale di 30 metri di luce ed una stele polifunzionale di 27 metri di altezza entrambe dotate di elevata trasparenza e progettate in sistema ibrido vetro-acciaio seguendo la concezione delineata.



Tecnasfalti srl

- #competenza 40 anni di esperienza nel settore
- #innovazione 3 business unit per oltre 100 prodotti in gamma
- #leadership più di 100.000.000 m² di sottopavimento venduti
- #crescita più di 20 paesi serviti del mondo

isolmant



isolmant.it

