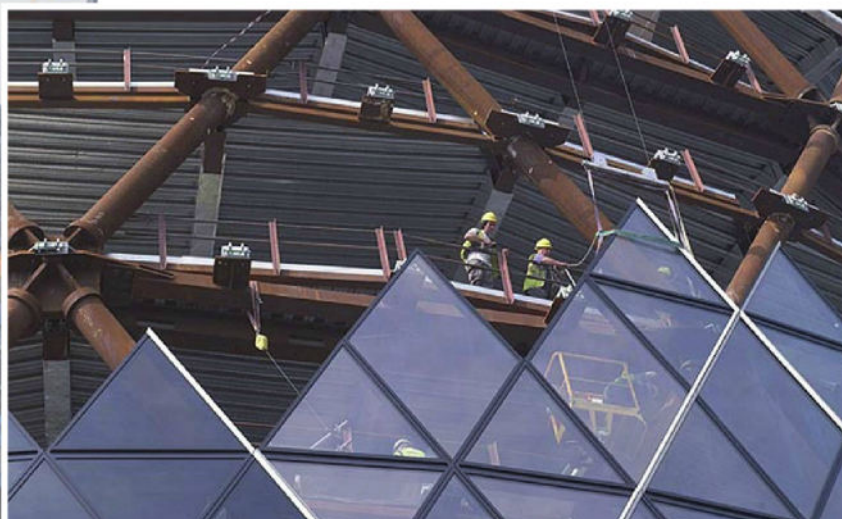
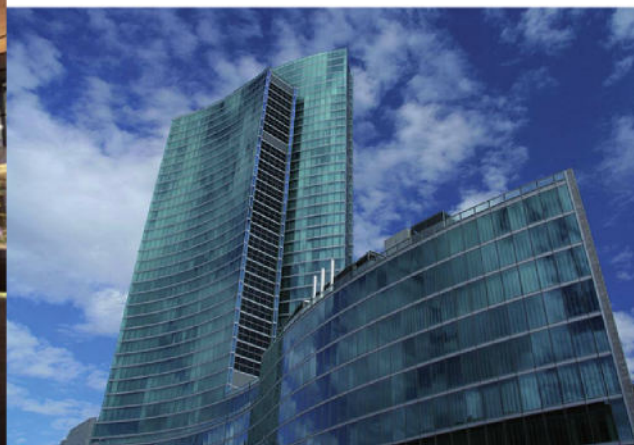


TECNO GLASNOST





A sinistra, vista del Double Cone del BMW Welt di Monaco. L'involucro del Double Cone è costituito da pannelli in vetro composto da mesh triangolari che ottimizzano molto bene la forma fluida prevista dall'architetto.

A destra, Palazzo Regione Lombardia, Pei Cobb Freed & Partners, Milano.

FREE FORMS

Le tensioni contemporanee dell'Architetto - la trasparenza, il dinamismo, la mutevolezza dell'edificio - dialogano con i software più raffinati in una rivoluzione della metodologia progettuale che diventa linguaggio. Il progetto complesso non si realizza senza coordinamento integrato e rappresentazione tridimensionale dell'intero processo. BIM per le forme libere o ... per liberare le forme

Enrico Sergio Mazzucchelli, Alice Ancillotti

Nella pagina a fianco, in alto a sinistra. Municipio di Alphen aan den Rijn (2002-2003), Olanda, Studio Octatube, primo esempio di "Blob Architecture". La facciata ha una superficie a doppia curvatura, realizzata con 850 pannelli di vetro piano, senza telaio, di diverse forme e dimensioni per ottimizzare la geometria dell'involucro.

In alto a destra, dettaglio Hadid Tower, Zaha Hadid

In basso a sinistra, 30 St Mary Axe, Norman Foster, Londra - vista dell'edificio.

In basso a destra, 30 St Mary Axe, Norman Foster, Londra - vista della fase di montaggio delle cellule di facciata.

L'utilizzo del vetro in architettura ha subito negli ultimi anni un incremento notevole, grazie alla sua trasparenza e all'aspirazione di molti progettisti contemporanei di ridefinire l'idea di una demarcazione netta tra spazi interni ed esterni. Le tendenze dell'architettura contemporanea verso la "smaterializzazione" vedono il vetro quale naturale protagonista: in primis per la sua trasparenza, ma anche per le riflessioni, le distorsioni ottiche, i cambiamenti di colore, la valenza architettonica e l'interazione in modo sempre diverso con l'ambiente circostante. Le origini di queste tendenze si riscontrano a partire dallo sviluppo delle facciate vetrate continue proposte dai maggiori esponenti del movimento moderno negli anni '20 - '30, da Mies Van Der Rohe a Walter Gropius, di pari passo con la nascita dei primi grattacieli. Lo scopo era quello di esplorare le potenzialità dell'innovazione tecnologica e di interpretarne le valenze dal punto di vista architettonico. Due esempi significativi dello sviluppo e della sperimentazione di nuovi materiali e nuove tecnologie costruttive di questo periodo sono senza dubbio il Seagram Building di Mies Van Der Rohe, con le sue proporzioni armoniche e l'uso attento di materiali resistenti all'azione del tempo, e il Grattacielo Pirelli di Giò Ponti che, con la tecnica dell'estrusione e la sua morfologia, consentì lo sviluppo di un vero e proprio approccio ingegneristico al progetto. Oggi sono stati compiuti notevoli progressi nell'offerta tecnologica di prodotti e sistemi rispetto a questi primi esempi, cosicché è stato possibile superare i problemi tecnici delle realizzazioni di allora, combinando elevati livelli di comfort termico degli ambienti interni con l'estensione, spesso preponderante, delle superfici trasparenti. Se un tempo le superfici destinate all'illuminazione naturale degli ambienti interni degli edifici costituivano infatti solo una limitata parte dell'involucro, oggi la continuità delle superfici e la versatilità di trattamento del vetro offrono nuove potenzialità,

ancora solo parzialmente esplorate. Ciò riguarda sia lo spazio architettonico interno, sia l'immagine che l'edificio offre di sé all'esterno, così che nell'opera di alcuni architetti contemporanei la naturale capacità del vetro di modificare il suo aspetto durante il corso della giornata, viene ridefinita anche attraverso l'uso di moduli o immagini stampate sulla superficie vetrata stessa.

INVOLUCRO (DI VETRO) EVOLUTO

L'offerta tecnologica in termini di prodotti in vetro consente di combinare diversi processi di lavorazione in modo da regolare opportunamente le proprietà di trasmissione del calore, del suono e della luce. Per migliorare il comfort termico si può far uso sia di vetri camera doppi o tripli, con intercapedine riempita con aria o gas nobili, sia di sottili rivestimenti (coating) depositati sulla superficie delle lastre. Nella maggior parte dei casi è una accorta combinazione di queste due tecnologie a garantire i migliori risultati. Le lastre in vetro possono inoltre essere stratificate con interlayer di materiali plastici, come ad esempio il PVB (polivinilbutirale), sia per motivi di sicurezza che per migliorare il livello di isolamento acustico dell'involucro. Dal punto di vista della radiazione luminosa è possibile infine realizzare vetri selettivi, capaci di essere "trasparenti" solo ad alcuni valori di lunghezza d'onda. Le facciate in vetro si guadagnano così sempre più l'appellativo di "involucro evoluto".

Accanto alle richieste estetiche, illuminotecniche, acustiche e termiche delle vetrazioni, occorre necessariamente considerare anche quelle statiche. Gli elementi in vetro possono essere progettati per assolvere essi stessi funzioni strutturali, sia come lastre sollecitate nel e fuori del loro piano medio, ma anche come travi, colonne, gusci. L'intrinseca fragilità del vetro, ovvero la bassissima resistenza alla propagazione delle cricche, ne ha impedito a lungo il suo utilizzo diffuso come materiale strutturale, ad esclusione di alcune realizzazioni del XIX secolo, nelle quali il vetro assume effettivamente un ruolo attivo in quanto irrigidisce e collabora alla stabilità dell'ossatura metallica, altrimenti troppo deformabile. Queste prove testimoniano certamente l'ingegno e il grande intuito dei progettisti di allora, ma in esse l'utilizzo del vetro come materiale strutturale resta un fatto quasi involontario, legato più all'istinto e alla buona pratica costruttiva che ad un atto di consapevole valutazione dei rischi.

La caratteristica che accomuna le opere architettoniche free forms è la complessità stilistica e geometrica della forma che, generata con l'ausilio di moderni software, non può essere ricondotta solamente alla sovrapposizione di forme semplici. Queste forme introducono nei progetti una fonte di complessità aggiuntiva, tanto rilevante da portare naturalmente a chiedersi il perché di questa esasperata ricerca verso tale "complessità geometrica", spesso ricercata nei criteri di efficienza energetica, nello studio della migliore esposizione climatica e dell'orientamento ottimale delle facciate, nell'integrazione nel contesto urbano e nel minimo impatto ambientale.

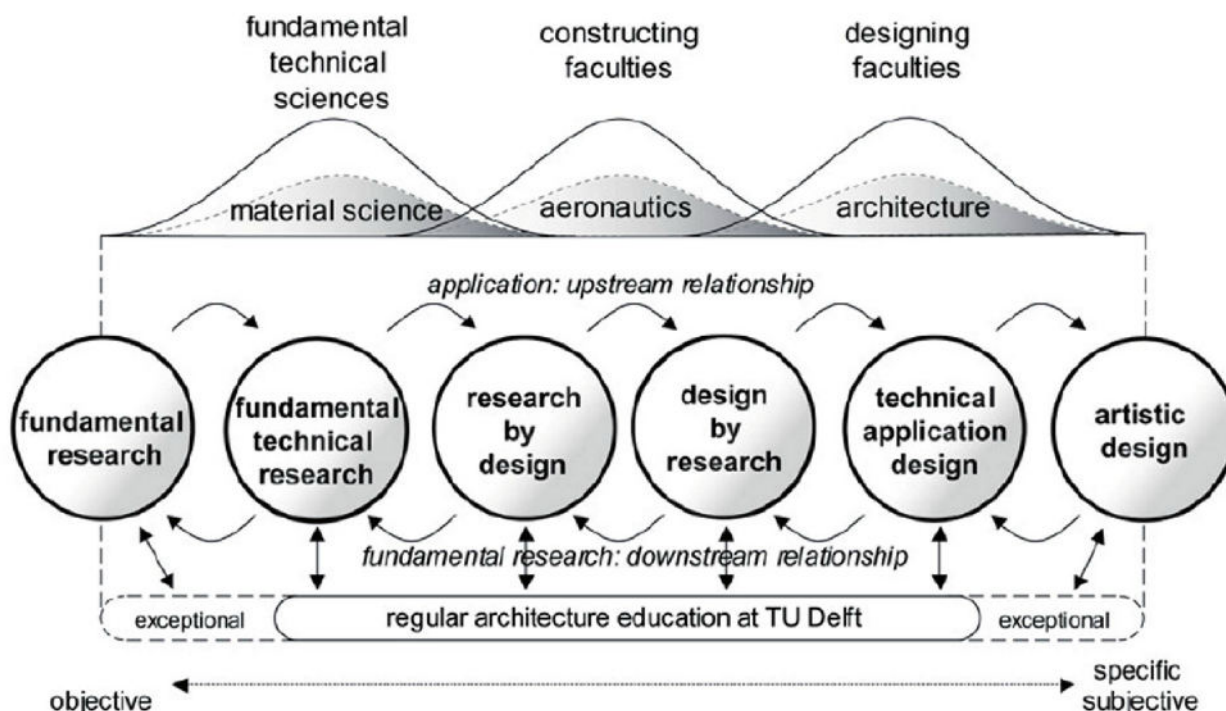
Quello attuale è tuttavia un periodo di transizione, in cui spesso la costruzione di progetti innovativi ricorre ancora di frequente a tecniche di tipo tradizionale. Ciò evidenzia la profonda distanza che attualmente



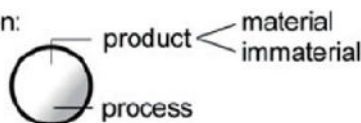
STORIA RECENTE A CAVALLO TRA ARCHITETTURA E INGEGNERIA

L'uso del vetro come materiale dichiaratamente strutturale è invece una novità introdotta di recente in architettura grazie agli sviluppi dell'ingegneria strutturale nell'ultimo quarto del XX secolo.

E' in questo contesto che nasce, ad esempio, la ricerca "Zappi" presso la University of Technology di Delft. Il termine "Zappi" è stato introdotto nel 1992 alla conferenza internazionale "The Glass Envelope" finalizzata al dibattito sullo stato dell'arte del vetro strutturale ed è stato definito come "materiale sconosciuto, completamente trasparente, strutturalmente affidabile e duraturo, resistente al fuoco, facile da mantenere, economico e sostenibile". Questa ricerca voleva unire l'esigenza degli architetti dell'utilizzo di un materiale completamente trasparente con quella di un materiale altamente performante, sia dal punto di vista statico, ma anche dal punto di vista del soddisfacimento delle altre prestazioni. Successivamente il termine "Zappi" è andato a delineare, in modo più ampio, una ricerca volta all'innovazione tecnologica dei materiali da costruzione e delle loro tecniche realizzative. L'iniziativa dei Professori Jaap Oosterhoff e Mick Eekhout della TU Delft aveva l'obiettivo di promuovere nuove invenzioni,



explanation:



relation between research and design

from: 'Platform Design' TU Delft 08.10.2002, prof.dr. Mick Eekhout
after: prof.dr. Guus Berkhout

mock-up, sperimentazioni, unendo il mondo accademico e quello della produzione, grazie alla collaborazione con lo Studio Octatube. Se inizialmente furono promosse molte ricerche sull'uso strutturale del vetro, sui metodi di connessione per i pannelli senza telaio, sulle tensostrutture e le strutture in vetro super leggere, successivamente la ricerca si è rivolta alla nuova "Blob Architecture" ed è diventata la base delle prime realizzazioni per il vetro curvato a freddo.

Infatti nell'Architettura Moderna, parallelamente ad un utilizzo preponderante del vetro, stiamo assistendo ad una nuova sfida: l'architettura delle "free forms". L'architettura delle forme libere o complesse, chiamata anche "Blob Architecture" (*blob = binary large objects*) o "Liquid Design", rappresenta attualmente una tra le sfide più avvincenti dell'ultimo secolo. Si tratta di un'architettura composta da forme irregolari che necessitano perciò di sistemi progettuali, tecnologici e strutturali differenti rispetto a quelli tradizionali. La geometria di queste architetture è completamente libera, non basata su superfici euclidee planari e, solitamente, ha come obiettivo la realizzazione di un'armonia fra l'edificio e l'ambiente circostante in cui lo stesso è inserito. Nelle realizzazioni della "Blob Architecture", la copertura e la facciata degli edifici spesso si fondono in un'unica "pelle", che usualmente l'architetto concepisce ispirato da principi funzionali o anche semplicemente scultorei, e che l'ingegnere razionalizza e rende costruibile utilizzando strumenti che spaziano dalla geometria differenziale, al calcolo variazionale, alla computer graphics.

Nella pagina a fianco a sinistra, Seagram Building, Mies Van Der Rohe, New York City. A destra, il Grattacielo Pirelli, Giò Ponti, Milano. Sotto, The Shard, Renzo Piano, London. La percezione visiva dell'edificio cambia in relazione alle condizioni climatiche e di illuminazione.

In questa pagina i sei anelli delle relazioni primarie fra ricerca di base, sviluppo tecnologico e progettazione di applicazioni architettoniche.

ancora esiste fra il progetto architettonico e quello strutturale e di involucro, e che risulta essere tanto maggiore quanto più complessa ed elaborata è la forma dell'involucro stesso. È inevitabile che la riduzione di questa distanza è strettamente legata ad una più efficace collaborazione fra le varie discipline volta alla messa a punto di un progetto integrato. Ciò a maggior ragione se si considera che proprio dalla particolare forma dell'involucro derivano le prestazioni statiche della struttura.

Una delle prime applicazioni di *"Blob Architecture"* è senza dubbio il municipio di Alphen aan den Rijn, in Olanda progettato e realizzato negli anni 2002-2003. La facciata presenta una superficie a doppia curvatura che è stata realizzata con 850 pannelli di vetro, senza telaio, di diverse forme e dimensioni per ottimizzare la geometria dell'involucro. Questa realizzazione utilizza pannelli di vetro piano per approssimare la forma fluida dell'involucro.

IL RUOLO DEI SOFTWARE DI PROGETTAZIONE, DALLA FORMA ... AL TENANT

Un ruolo fondamentale per la realizzazione di questo tipo di architetture è l'uso di ICT (*Information and Communications Technology*). Specifici software servono per progettare, calcolare e governare il processo di produzione di edifici e dei loro componenti, senza i quali, le free forms sarebbero di difficile realizzazione. In questo contesto, l'approccio progettuale basato sulla scomposizione del problema in sotto modelli piani non può più essere applicato. Per questo, programmi di modellazione tridimensionale permettono all'architetto di disegnare in modo semplice complessi volumi tridimensionali, mentre programmi di analisi fondati sul Metodo degli Elementi Finiti aiutano gli ingegneri nell'analisi di strutture complesse. Entrando più nel dettaglio l'interattività tra progettista e tecnico abilitato all'uso di software come: CG (computer graphics); CAD (computer aided design); CAAD (computer aided architectural design); CAE (computer aided engineering); CAM (computer aided manufacturing), ha rivoluzionato la metodologia progettuale e, implicitamente, il linguaggio ed il supporto della documentazione di progetto. L'elaborazione progettuale viene interfacciata da hardware e software interattivi. Per questo il supporto topologico e geometrico del progetto architettonico e delle strutture diviene necessariamente integrato. In tale contesto ha assunto un ruolo fondamentale

la progettazione e la gestione del progetto con sistemi BIM. L'acronimo BIM (*Building Information Modelling*), indica un processo collaborativo che associa alla rappresentazione tridimensionale di elementi costruttivi un database di informazioni alfanumeriche. L'uso della tecnologia BIM per la progettazione di forme complesse è indispensabile, non solo per una corretta gestione tridimensionale delle geometrie fluide, ma anche per una coordinazione integrata con le diverse discipline progettuali atte ad individuare tempestivamente le criticità di alcune soluzioni, già nella fase preliminare. Ma l'utilità della tecnologia BIM non si esaurisce nella fase progettuale e di controllo della corretta corrispondenza fra progetto e produzione, durante la fase di avanzamento dei lavori, ma può avere un ruolo fondamentale anche per la fase di pianificazione e gestione dei costi, nonché nel controllo qualità e sicurezza, e nella successiva gestione del fabbricato da parte del "tenant".

E PER COSTRUIRE, SI RAGIONA A PANNELLI

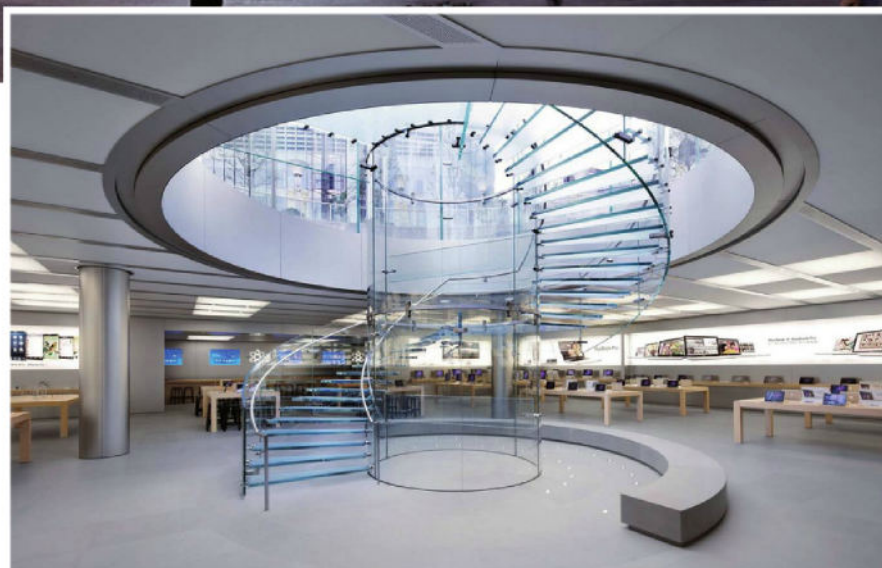
Costruire architetture di tale complessità geometrica rappresenta, pertanto, una sfida sotto vari aspetti. Il fascino e la libertà espressiva delle "free forms" devono inevitabilmente confrontarsi con una spesso maggiore complessità realizzativa, talvolta con il livello di preparazione delle maestranze e con le potenzialità delle tecnologie costruttive a disposizione, quasi sempre con una forte attenzione all'aspetto delle risorse finanziarie. Da ciò discende che un processo di "razionalizzazione" del progetto stesso è di per sé inevitabile e deve essere finalizzato a rendere fattibile l'intervento in termini esecutivi ed economici. Nei primi progetti di questo tipo l'attenzione è stata posta sul "problema di approssimazione" della superficie di involucro. Tale aspetto è stato affrontato tramite metodi geometrici in grado di descrivere in modo sufficientemente accurato la forma iniziale attraverso superfici "sfaccettate" di tipo traslazionale, rotazionale e combinazione delle due. Gradualmente si è integrato questo passaggio all'interno del processo realizzativo e si è ricorsi ad algoritmi matematici per la suddivisione di superfici sempre più accurati ed efficienti. Allo stesso tempo l'attenzione della ricerca scientifica si è concentrata sul "problema di progetto" delle superfici, che non saranno più completamente "libere" ma soggette anche a vincoli di natura statica correlati anche alle esigenze dei processi di produzione

LA COMPLESSITÀ
STILISTICA E
GEOMETRICA
DELLE
ARCHITETTURE
RECENTI,
GENERATA
CON L'AUSILIO
DI MODERNI
SOFTWARE, NON
PUÒ ESSERE
RICONDOTTA
SOLAMENTE ALLA
SOVRAPPOSIZIONE
DI FORME SEMPLICI



Vista dell'esterno dell'Apple Store, Shanghai.

Vista dall'interno dell'Apple Store, Shanghai.



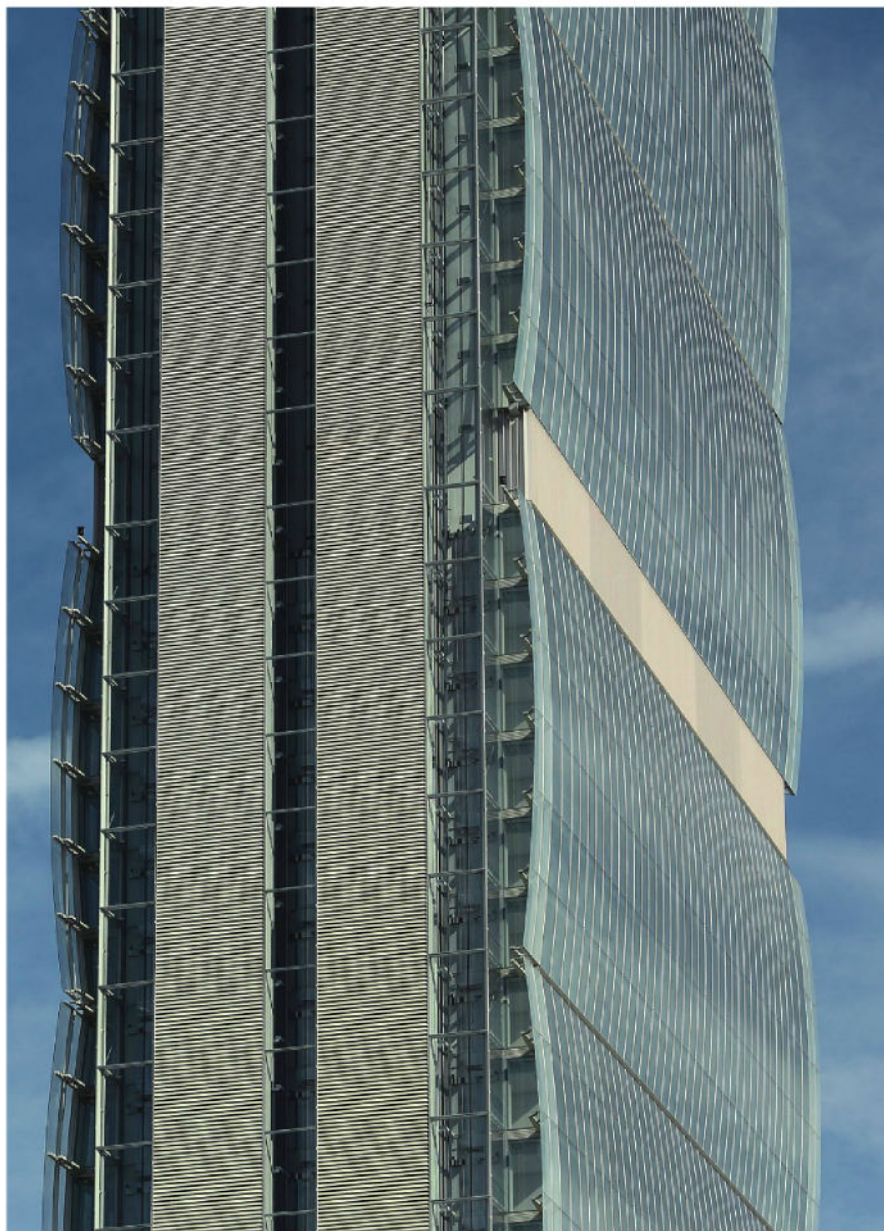
industriale dei componenti di involucro. Questo processo si concretizza in una serie di accorgimenti quali la scelta del metodo di "pannellizzazione" della superficie, dei materiali da utilizzare per il rivestimento dell'involucro, dello schema statico e del sistema costruttivo. Le difficoltà presenti in tale procedimento sono evidenti, in particolar modo per ciò che concerne le superfici trasparenti. Il problema principale è rielaborare la su-

perficie di progetto al fine di suddividere questa in pannelli discreti: è una fase complessa e piena di conseguenze con specifico riferimento alla struttura portante, nonché alla trasparenza globale dell'involucro.

Nel corso degli anni si sono sviluppate varie tecniche di pannellizzazione delle forme libere, le quali si differenziano in relazione alla capacità di soddisfare i requisiti di: economia (tipi di lavorazioni

richieste, spreco di materiale), fattibilità (semplicità dei nodi, efficacia della struttura portante), aderenza alla geometria di progetto (grado di approssimazione della superficie, grado di trasparenza raggiunto, nel caso di strutture in vetro). Le tecniche più comuni sono le seguenti:

- *mesh* triangolari: è stata la prima tecnica di suddivisione usata per il discreto grado di approssimazione raggiungibile,



Vista del cantiere della Torre Isozaki, Arata Isozaki, Milano

nonché per la possibilità di realizzare rivestimenti esclusivamente a mezzo di pannelli piani. Con questa procedura di discretizzazione si ottengono strutture di supporto stabili (la maglia triangolare è internamente isostatica) ed al contempo possono essere realizzati involucri trasparenti su geometrie libere. Nonostante ciò gli svantaggi sono innumerevoli, per esempio un basso grado di trasparenza, la pesantezza della struttura di supporto, la torsione geometrica dei nodi. Per tutti questi motivi le mesh triangolari non hanno trovato ampia diffusione, se non in casi particolari quali le strutture geodetiche o quelli in cui la complessità della superficie di progetto ne ha obbligato l'uso;

- *mesh* quadrilatere: esse permettono di ridurre la complessità dei nodi (in cui si intersecano quattro aste e non più sei) e contestualmente semplificano la realizzazione dei pannelli, specie se fabbricati in materiale fragile quale il vetro, grazie alla maggiore ampiezza degli angoli. Mostrano inoltre una trasparenza sensibilmente più marcata, anche in virtù di una sottostruttura più leggera e meno ingombrante. A fronte dei vantaggi menzionati, le mesh quadrilatere non garantiscono a priori la pla-

narità delle facce. Questo è un requisito sostanziale il cui soddisfacimento, perlomeno parziale, è da ritenersi irrinunciabile allo scopo di contenere i costi di realizzazione (almeno fino allo sviluppo della tecnica di piegatura a freddo del vetro di cui si parlerà in seguito);

- superfici rigate: costituiscono una particolare categoria di superfici a semplice e doppia curvatura particolarmente utili allo scopo della pannellizzazione in ragione della possibilità di ottenere strutture di supporto semplificate, nonché di apportare economie nella realizzazione degli stampi;

- *mesh* esagonali: costituiscono uno schema di suddivisione innovativo, ancora poco sfruttato anche se possiede ottime proprietà. Tra queste si sottolinea la bassa valenza dei nodi (tre per i nodi regolari), che si traduce direttamente in semplicità di fabbricazione e, in modo forse meno intuitivo, anche in una accresciuta flessibilità verso la possibilità di definire mesh parallele.

TECNOLOGIE E CASI DI STUDIO

Vetri piani

Senza dubbio la tecnologia realizzativa più adatta dipende da progetto a progetto, al variare di molti parametri fra cui: la geometria del manufatto, il livello di curvatura, il risultato estetico atteso, la velocità di produzione e di posa in opera, i costi preventivati.

La prima forma di approssimazione che può essere effettuata per la realizzazione di queste superfici fluide è senza dubbio l'uso di pannellature piane. Per questo tipo di tecnologia realizzativa l'approssimazione che più si avvicina alla forma desiderata, specialmente per superfici che presentano una doppia curvatura, è sicuramente la discretizzazione in mesh triangolari. Ad esempio, l'edificio 30 St Mary Axe di Londra, o più comunemente soprannominato "The Gherkin", progettato da Norman Foster per il gruppo assicurativo Swiss Re Building, usa il vetro piano per approssimare la sua caratteristica forma a "uovo". Infatti, nonostante il profilo curvilineo, c'è solo un elemento di vetro curvato sull'edificio: una copertura a lente sulla sommità.

Un'alternativa per la discretizzazione piana delle superfici è quella di utilizzare mesh quadrilatere. In tale ambito, due importanti esperienze italiane sono Palazzo della Regione Lombardia e Torre Unicredit a Milano. Il primo, che ospita gli uffici della Regione Lombardia, è costituito da una torre di 43 piani che si sviluppa per un'altezza di circa 160

m e da corpi bassi articolati attorno ad una piazza centrale. L'involucro vetrato che caratterizza tutto il complesso è costituito da una doppia pelle attiva e si sviluppa su una superficie di 75.000 m², presentando una geometria fluida e curva. Tale conformazione geometrica variabile ha richiesto una particolare attenzione progettuale che ha permesso di utilizzare, per quasi tutto il complesso, un'unica tipologia di cellula piana quadrangolare, di larghezza 1,80 m e alta quanto un piano. Ciò, ha portato a una notevole riduzione del numero delle matrici di estrusione (in totale 25) realizzate "ad hoc" per la produzione degli estrusi in alluminio, necessari per la realizzazione della facciata.

La Torre Unicredit, invece, fa parte del quartiere di Porta Nuova Garibaldi, recentemente riqualificato. L'involucro è costituito da un sistema a cellule (*Unitized System*) di dimensioni 1,48 x 5,12 m e di 180 mm di profondità. Anche in questo caso, per realizzare la superficie a singola curvatura e che caratterizza il complesso, le cellule non formano un angolo piano l'una con l'altra bensì un angolo variabile, accentuato nella parte terminale della Torre Unicredit, dove la curvatura si fa più importante e dove, in

alto si eleva la guglia di oltre 80 m chiamata "Spire" che caratterizza lo skyline di Milano.

VETRO CURVATO A CALDO

Differente è l'approccio per quanto concerne l'utilizzo di vetri curvi. Le tecnologie di curvatura dei vetri possono essere essenzialmente di tre tipi: a caldo, a tiepido, a freddo.

Il vetro curvato a caldo è sicuramente una valida alternativa per la realizzazione di superfici dalle forme libere, specialmente per forme e curve dai raggi di curvatura molto accentuati. In questi casi, il vetro curvato a caldo si rileva come l'unica, valida alternativa per avvicinarsi quanto più possibile alla forma progettata. Questo processo, esiste da tempo nel campo dell'industria del vetro ed è usato, prevalentemente per il design automobilistico. Per la realizzazione del vetro curvato a caldo esistono, essenzialmente, due processi produttivi. Il processo produttivo standard è quello di curvare il vetro su apposito stampo. Tale processo prevede il posizionamento della lastra di vetro, ancora piana, su opportuni stampi metallici, sagomati "ad hoc" per realizzare la curvatura richiesta. Il vetro su stampo viene

**VETRO IN CHIAVE
CONTEMPORANEA
SIGNIFICA
TRASPARENZA, MA
ANCHE RIFLESSI,
DISTORSIONI
OTTICHE,
CAMBIAMENTI DI
COLORE, VALENZA
ARCHITETTONICA
E INTERAZIONE
IN MODO SEMPRE
DIVERSO CON
L'AMBIENTE
CIRCOSTANTE**

TECNOLOGIA	DESCRIZIONE	ESEMPIO
Pannellature piane	Discretizzazione con mesh triangolari	The Gerkin, Londra, Norman Foster, 2004
	Discretizzazione con mesh quadrilateri	Altra Sede Regione Lombardia, Milano, Pei Cobb Freed Partners + Caputo, 2011 Torre Unicredit, Milano, César Pelli, 2012
Piegatura a caldo	La lastra di vetro può essere piegata sia lungo il suo asse verticale sia lungo quello orizzontale. E' possibile curvare vetri di spessore tra i 3 e i 19 mm, per dimensioni max di circa 2500 mm x 4000 mm.	Glass Pavilion del Toledo Museum of Art, Toledo, USA, studio SANAA, 2006 Apple Store, Shanghai, Bohlin Cywinski Jackson (BCJ), 2010 Musei di Joanneumsviertel, Graz, Austria, eep architekten e Nieto Sobejano Arquitectos, 2011
Vetro curvato a tiepido (cold Bent)	Il processo può essere utilizzato per curvature del vetro non troppo elevate. Il vetro piegato a forma di arco presenta una elevata resistenza al carico per carichi distribuiti ad azione perpendicolare alla lastra (peso proprio, neve e vento, se il vetro è utilizzato come copertura).	Loggia a Wasseraifingen, Aalen, Germania, 2000.
Piegatura a freddo	Il raggio di curvatura a freddo raggiungibile è di circa 1.500 volte lo spessore del vetro da curvare. Il comportamento è condizionato anche dalla tipologia di <i>interlayer</i> (se il vetro è stratificato), dalla temperatura e dalla durata della deformazione. Se una lastra non è vincolata a un telaio perimetrale questa avrà una piegatura libera e sarà vincolata solamente agli angoli. In questo caso i pannelli si chiamano a piegatura "libera" (anche detti <i>free warp panels</i>).	Edificio Park House, Londra, Robin Partington & Partners, 2012. Torre Isozaki, Arata Isozaki + Andrea Maffei, 2015, Milano. Torre Hadid, Zaha Hadid, 2016, Milano.

L'ESASPERATA RICERCA VERSO LA "COMPLESSITÀ GEOMETRICA" È SPESSO RICERCATA NEI CRITERI DI EFFICIENZA ENERGETICA, NELLO STUDIO DELLA MIGLIORE ESPOSIZIONE CLIMATICA E DELL'ORIENTAMENTO OTTIMALE DELLE FACCIATE, NELL'INTEGRAZIONE NEL CONTESTO URBANO E NEL MINIMO IMPATTO AMBIENTALE



così posto in una camera calda dove cuoce per circa 5-6 ore fino a raggiungere temperature variabili (a seconda dei produttori) dai 470°C ai 650°C. Al raggiungimento di circa 500°C il vetro comincia a diventare plastico e per caduta inerziale, inizia un processo di adattamento alla forma dello stampo metallico. Spesso, l'azione di curvatura della lastra viene coadiuvata da dispositivi meccanici o pneumatici, che agevolano il processo, curvando il vetro a viscosità più alte e tali da non inficiare le caratteristiche originarie della lastra dopo il contatto con lo stampo. Dopo questa fase, il vetro viene raffreddato molto lentamente (processo di ricottura del vetro), per evitare di indurre tensioni che ne precluderebbero un'eventuale successiva lavorazione o che potrebbero innescare fenomeni di rottura spontanea del materiale.

La lastra di vetro può essere piegata sia lungo il suo asse verticale sia lungo quello orizzontale. Il primo processo è però associato a tolleranze di fabbricazione più elevate e la qualità ottica, solitamente, è inferiore, per questo viene utilizzato solo quando sono richieste geometrie di curvatura estreme. Sullo stampo possono essere posizionate anche due o più lastre di vetro collegate da fogli di PVB che vengono cotti insieme all'interno del forno, per poi passare

in autoclave e formare così un elemento stratificato, così come possono essere curvate su stampo più lastre, distanziate per mezzo di appositi spessori per essere successivamente assemblate a formare un vetrocamera. E' possibile curvare vetri di spessore tra i 3 e i 19 mm, per dimensioni massime (variabili da produttore a produttore) di circa 2500 mm x 4000 mm. Per la realizzazione di elementi con importanti raggi di curvatura o di curvatura secondo due assi sono stati recentemente studiati e realizzati stampi metallici con snodi centrali in modo da favorire una deformazione graduale della lastra, evitandone la rottura causata da una troppo rapida deformazione del vetro in fase plastica. Qualora si avesse la necessità di realizzare vetri con differenti curvature, la piegatura a caldo su stampo implica per ognuna di esse la realizzazione di un apposito stampo. Per tale motivo il processo di realizzazione del vetro curvato a caldo su stampo si adatta bene a una produzione di massa, come quella dell'industria automobilistica, mentre ben poco si adatta alle realizzazioni di geometrie a forma fluida variabile tipiche di un particolare edificio. Se si volessero ottenere lastre curve temprate o indurite, per motivi di sicurezza o di shock termico, è possibile utilizzare dei forni di tempra appositamente "modifi-



Park House, Robin Partington & Partners,
Londra.



cati" che sono dotati di rulli di trascinamento a geometria variabile che consentono, contemporaneamente, di curvare il vetro e di temperarlo o indurirlo. Questo tipo di processo è molto utile se è richiesta una produzione di vetri con raggi di curvatura di ampiezza variabile, perché permette una ottimizzazione sulla produzione degli stampi. Il processo, però, permette di realizzare vetri curvi con raggio di curvatura costante in una sola direzione e, solitamente, nella direzione verticale della lastra di vetro. Esistono pochi produttori che hanno forni di tempra che permettono la curvatura nella direzione orizzontale. In generale le lastre curvate a caldo sono più rigide di quelle piane, e possono deformarsi meno in caso di carico. I raggi minimi e massimi di piegatura realizzabili dipendono molto dalla dimensione delle lastre e dal loro spessore. I vetri curvi monolitici possono essere differenziati in vetro cilindrico con raggi di curvatura costante e vetro conico, per cui il raggio di curvatura cambia linearmente. I vetri curvati con doppia curvatura possono essere: sferici, asferici (paraboloide), o a forma di sella. Per realizzare una di queste geometrie è necessario riferire al produttore tutti i parametri necessari alla definizione della forma. I raggi di curvatura solitamente arrivano fino ad un minimo di 2 m: raggi più piccoli possono invece condurre all'instabilità della lastra o alla piegatura dei bordi. Il controllo della geometria di curvatura e le tolleranze di errore sono fondamentali per ottenere un buon risultato. La qualità ottica del vetro curvato e la planarità della superficie è estremamente dipendente dalla qualità del processo produttivo, e per tale motivo è importante effettuare un controllo su campioni preliminari, di tutte le geometrie differenti che si intende realizzare.

Un significativo esempio di realizzazione di involucro trasparente con vetri curvati a caldo per realizzare una superficie cilindrica è il Glass Pavilion del Toledo Museum of Art, sito a Toledo nello stato di Ohio negli Stati Uniti, progettato dagli architetti Kazuyo Sejima e Ryue Nishizawa dello studio Sanaa. Inaugurato nel 2006, il Padiglione del vetro è sede della rinomata collezione d'arte vetraria del museo ed è esso stesso un'opera d'arte con le sue pareti esterne ed interne completamente in vetro curvo senza telaio, risultato di una struttura trasparente che sfuma i contorni tra interno ed esterno.

Ma l'esempio emblematico ed estremizzante di questo processo produttivo è senza dubbio l'Apple Store di Shanghai, concluso nel 2010. Lo Store è collocato al piano interrato nel centro finanziario di Shanghai ed è caratterizzato da una grande torre cilindrica di vetro alta 12 metri che sembra fuoriuscire dal terreno e che caratterizza il foyer di ingresso. L'esterno è collegato con il piano interrato sottostante per mezzo di una appariscente scalinata di vetro a chiocciola. Per la realizzazione sono stati utilizzati pannelli in vetro fra i più grandi al mondo. La torre in vetro è costituita da 12 pannelli in vetro infrangibile di sicurezza curvati a caldo e prodotti interamente in Cina. Un ulteriore esempio, estremamente interessante, è il nuovo ingresso dei Musei di Joanneumsviertel, nel centro storico di Graz in Austria, terminato nel

2011. Gli architetti dello studio di "eep architekten" di Graz e Nieto Sobejano Arquitectos di Madrid hanno progettato dei coni di vetro che si inseriscono nel terreno e servono da collegamento fra le due ali del museo, nonché ad illuminare gli ambienti dei piani interrati.

I coni di vetro hanno un asse centrale ad inclinazione variabile fino a un massimo di circa 15° sulla verticale e diametri sempre diversi fra loro, fino ad un massimo di 16 m. Alcuni di essi si compenetrano, andando a creare suggestive forme fluide. Per la realizzazione sono state utilizzate lastre di vetro piegate a caldo, sagomate a forma troncoconica. I pannelli sono stati inizialmente piegati insieme su stampo per realizzare la forma desiderata, stratificati in autoclave, e successivamente assemblati per andare a formare vetrate isolanti.

VETRO CURVATO A "TIEPIDO"

Un processo produttivo intermedio fra il vetro curvato a caldo e il vetro curvato a freddo, è il vetro curvato a "tiepido" (spesso questo processo viene chiamato "Cold Bent", poiché usa una temperatura molto bassa per piegare le lastre di vetro ma, per distinguerlo dal vetro piegato a temperatura ambiente si è preferito chiamarlo in questa sede vetro curvato a tiepido). Questa tecnologia consiste nel piegare il vetro per mezzo di uno stampo, applicandovi dei pesi e cuocendolo a basse temperature. Il processo può essere utilizzato per curvature del vetro non troppo elevate e si presenta come alternativa economicamente vantaggiosa rispetto alla piegatura a caldo. Ovviamente, se vengono usati spessori di vetro elevati la lastra sarà più rigida e quindi sarà più difficile

curvarla. Alcuni dei vantaggi di questo processo produttivo sono riconducibili al fatto che il vetro piegato a forma di arco presenta una elevata resistenza al carico per carichi distribuiti ad azione perpendicolare alla lastra (peso proprio, neve e vento, se il vetro è utilizzato come copertura). Tuttavia, per tale motivo lo spessore della lastra di vetro può essere ridotto (e conseguentemente i costi del materiale), mentre costi e tempi di produzione sono notevolmente inferiori rispetto al vetro piegato a caldo.

Un esempio di utilizzo di questa tecnologia è la loggia costruita a Wassefingen ad Aalen, in Germania, nel 2000. La loggia è stata la prima applicazione di questo processo produttivo e prima della sua ultimazione sono stati compiuti numerosi test sperimentali. Inizialmente è stato indagato il comportamento dell'interlayer in PVB soggetto ad alte temperature. Con questi risultati sono state compiute analisi numeriche per orientare la scelta sulle dimensioni ottimali delle lastre di vetro della loggia e, successivamente, sono stati compiuti test fisici per verificare la resistenza ultima della lastra. La loggia ha una lunghezza di 14 m, è larga 6 m ed è costituita da 7 pannelli. Ciascun elemento è lungo 5,40 m e largo 2 m ed è composto da vetro stratificato di sicurezza costituito da due lastre di 12 mm. Gli elementi sono fissati meccanicamente a quattro punti di fissaggio che si trovano leggermente decentrati rispetto agli angoli del pannello. Le coppie opposte dei punti di ancoraggio sono collegate mediante tiranti.

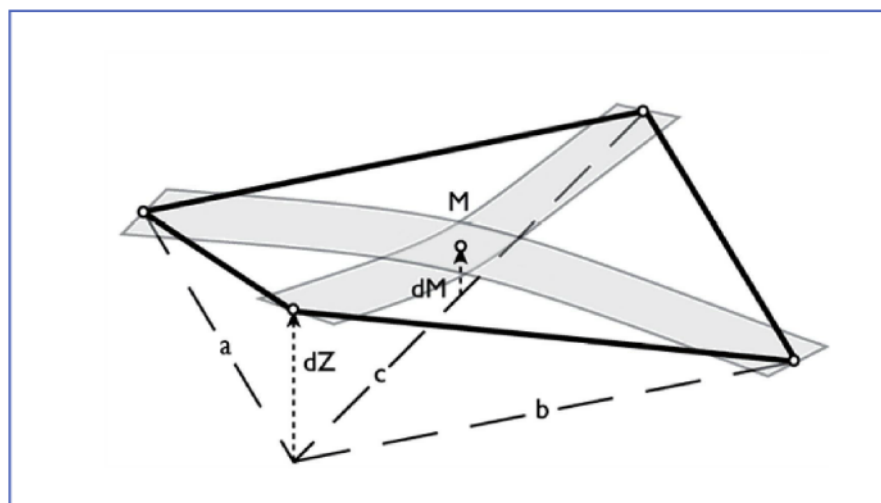
VETRO CURVATO A FREDDO

La piegatura a freddo dei vetri è invece un processo relativamente nuovo. I primi

esempi di vetri curvati a freddo si sono avuti attorno a 15-20 anni fa e ancora oggi tale processo rimane non del tutto investigato. In questi anni, comunque, sono andate delineandosi varie metodologie applicative per piegare i pannelli di vetro a freddo. Il raggio di curvatura a freddo raggiungibile è di circa 1.500 volte lo spessore del vetro da curvare (ad esempio, per un vetro di 10 mm il raggio di curvatura massimo è di 15 m). Il comportamento del vetro, quando è forzato in una geometria curva, è condizionato dalla torsione imposta, dalla forma del pannello, dallo spessore del pannello e dalle condizioni di vincolo perimetrale. Il comportamento è condizionato anche dalla tipologia di interlayer (se il vetro è stratificato), dalla temperatura e dalla durata della deformazione. Se una lastra non è vincolata ad un telaio perimetrale questa avrà una piegatura libera e sarà vincolata solamente agli angoli. In questo caso i pannelli si chiamano a piegatura "libera" (anche detti free warp panels).

Quando una lastra vetrata senza telaio, vincolata solamente ai quattro angoli, è deformata, con i bordi liberi di muoversi, la deformazione tende ad adottare una fra due possibili configurazioni. Inizialmente la lastra deformata tende verso una doppia curvatura con lati rettilinei, ma, raggiunto un punto critico, modifica il suo comportamento dominante e tende ad assumere una forma che si approssima ad una singola curvatura. Questo comportamento è influenzato dalla dimensione del vetro, dai rapporti di proporzione tra i lati della lastra e dal suo spessore. Esso è inoltre influenzato dalla temperatura, dalla durata e dalla forma (occorre notare che la prestazione dell'interlayer è già di per sé dipendente da tempo e temperatura).

I pannelli a piegatura vincolata (detti anche restrained warp panels) comprendono invece un telaio in alluminio a cui sono fissate le unità vetrate e sono inoltre provvisti di ritegni sugli angoli. Quando una lastra di vetro è fissata ad un telaio piano e quindi messa in torsione con il telaio, il comportamento strutturale è differente rispetto ad un pannello con piegatura libera. La distribuzione degli stress nel vetro è differente e la magnitudo degli stress di picco è generalmente maggiore (il vincolo aggiuntivo al vetro aumenta gli stress e questo varia con l'importanza della piegatura). Sia per i pannelli a piegatura libera che per i pannelli a piegatura vincolata, il procedimento di curvatura implica che le unità stesse siano fabbricate piane e quindi forzate in posizione curva. Un'al-





Ingresso dei Musei di Joanneumsviertel, vista esterna, eep archititekten e Nieto Sobejano Arquitectos, Graz.

Ingresso dei Musei di Joanneumsviertel, vista interna.

ternativa, invece, è quella di fabbricare i telai già deformati, su cui applicare successivamente la lastra vetrata: si tratta di pannelli piegati prima della posa (anche chiamati pre-warped). La rigidità del vetro tenderebbe a raddrizzare il telaio e l'unità così composta ha pertanto una geometria intermedia fra quella del telaio precurvato e quella del vetro piano. Tra le applicazioni più recenti di questa tecnologia si segnala l'edificio a destinazione sia direzionale, sia residenziale denominato Park House, progettato da Robin Partington & Partners e sito all'interno dell'isolato compreso tra Oxford Street e North Row a Londra.

La costruzione, iniziata nel 2010 e conclusa nel novembre 2012, presenta una particolare geometria a doppia curvatura (sui piani verticale e orizzontale), sulla base dello sviluppo formale dello sferoide prolato. Il raccordo degli elementi sui due piani si congiunge nei quattro vertici dell'edificio mediante spicchi conici. Questa elegante geometria viene caratterizzata, inoltre, da costolature trasversali realizzate mediante la giustapposizione di estrusi in alluminio che evidenziano macro-aggregati di cellule. La facciata è costituita da cellule semi-strutturali a ritegno meccanico e da dispositivi frangisole verticali in alluminio. La chiusura al piano terra, è caratteriz-

zata, invece, da una facciata a montati e traversi composti da una vetrata in lastra stratificata, inclinata verso l'esterno di $4,5^\circ$ sul piano verticale. Lo sviluppo del progetto esecutivo ha comportato la gestione di interfacce geometriche complesse, sia verticali, sia orizzontali. Attraverso l'uso di appositi software è stata indagata la discretizzazione ottimale dell'involucro per realizzare la forma voluta, arrivando a definire il limite di deformazione a freddo accettabile per tali cellule in circa $L/100$, dove L è la lunghezza della diagonale della cellula. La maggior parte dei pannelli sono stati piegati a freddo in cantiere (con una piegatura variabile massima fino a 50 mm) mentre altri, che prevedevano una deformazione accentuata, sono stati piegati a caldo in fabbrica e successivamente trasportati in cantiere.

Un'applicazione degna di nota è senza dubbio l'involucro della Torre Isozaki, facente parte del complesso di CityLife di Milano. Essa è stata progettata dall'architetto giapponese Arata Isozaki ed è attualmente la torre più alta d'Italia. La Torre aspira alla massima verticalità con la sua pianta molto stretta e allungata che misura 21×58 metri ed è finalizzata ad uno snellimento del volume per accentuarne la verticalità. La sua forma a pianta regolare si contrap-



Torre Unicredit, César Pelli, Milano.

pone ad un involucro sinuoso. Infatti, la facciata è composta da un modulo curvo, costante e ripetitivo, che avvolge sei piani. Le onde si sovrappongono una all'altra andando a creare una sorta di "Endless tower", che si protrae verso l'infinito. La facciata a cellule è costituita da un modulo tipico di 1500x3900 mm e presenta un vetrocamera doppio costituito da vetro stratificato indurito esterno, doppia camera di 16 mm con argon al 90% e vetro temprato interno. Il processo di curvatura a freddo attuato è del tipo "pre-warped". Il doppio vetrocamera è infatti posato su di una cellula con profili precedentemente calandrant e caricato con appositi pesi sul lato corto. Il pannello viene curvato, quindi, sotto l'azione combinata di peso proprio e carico applicato fino a raggiungere la freccia richiesta. La deformata di ogni cellula varia a seconda di dove essa è collocata, fino ad un massimo di 22 mm. E' importante sottolineare, che a differenza del caso precedente, si tratta di vetro piegato lungo una sola direzione che dà origine pertanto ad una singola curvatura. Una volta piegati i vetri in stabilimento, essi sono stati inseriti nel loro telaio e trasportati in cantiere per la posa. Questo ha implicato, sicuramente, meno incertezze e criticità rispetto ad una piegatura diretta sul sito di costruzione. Di contro, vi è stato una minore ottimizzazione per le spese di trasporto e di imballaggio per i vetri già deformati, che avranno sicuramente occupato più spazio.

LO STATO DELL'ARTE

In conclusione è possibile affermare che ad oggi esistono essenzialmente tre differenti tecnologie per la realizzazione di "free forms" in vetro. Le differenze che si riscontrano fra queste tecniche sono molteplici e di diversa natura. Non può essere stabilito a priori quale sia la migliore tecnologia, ma, per ogni progetto dovranno essere valutati attentamente i vantaggi e gli svantaggi di ogni tecnologia, per individuare quale di queste più si addice al caso in esame. Senza dubbio si dovrà valutare la geometria da realizzare e

la discretizzazione ottimale della stessa, quindi la curvatura dei pannelli, sia questa singola o doppia, così come il risultato estetico atteso. Dovranno essere valutati i costi di incidenza sul progetto e i tempi con il quale essa dovrà essere realizzata, sia in relazione a produzione che posa in opera. Questi aspetti sono tutti interconnessi fra loro e dovranno essere valutati parallelamente, per giungere alla scelta realizzativa ottimale.

In particolare, la piegatura a freddo dei vetri è un processo promettente e di relativamente recente sviluppo. Esso è una valida alternativa al processo di piegatura a caldo in quanto permette di evitare la produzione di costosi stampi per la realizzazione degli elementi. Come si è sottolineato nel caso della Torre Hadid di CityLife, la realizzazione delle facciate con vetro curvato a caldo avrebbe comportato eccessivi costi di costruzione dal momento che, in questa particolare facciata, ogni cella è unica e caratterizzata da una forma diversa forma e curvatura.

Il processo di piegatura a freddo in cantiere è quindi una valida alternativa anche ai pannelli di tipo pre-warped, dal momento che implica un risparmio di: costi di produzione dei profili calandrant, costi di trasporto e tempi di produzione. Tuttavia, specie per i vetri di tipo stratificato, si ritiene che nel prossimo futuro debbano essere approfonditi ulteriori aspetti ad oggi poco investigati, tra cui il comportamento nel lungo periodo: la viscosità dell'interlayer potrebbe infatti portare a una variazione delle sollecitazioni che sarebbe opportuno conoscere e valutare a priori.

Categoria/caratteristica	Vetro piano	Hot bending (Curvatura a caldo)	Cold Bending (Curvatura a freddo)
Riproduzione fedele della forma	bassa	alta	alta
Costo	basso	alto	basso
Velocità di produzione	alta	bassa	alta
Tecnologie	semplici	complesse	semplici
Curvature ottenibili	-	elevate	basse
Sollecitazione nel vetro	assente	assente	presente
Sollecitazione nell'interlayer	assente	assente	presente
Riflessione ottica	sfaccettata	perfetta	perfetta
Confronto tra vetro piano, curvatura a caldo e curvatura a freddo.			

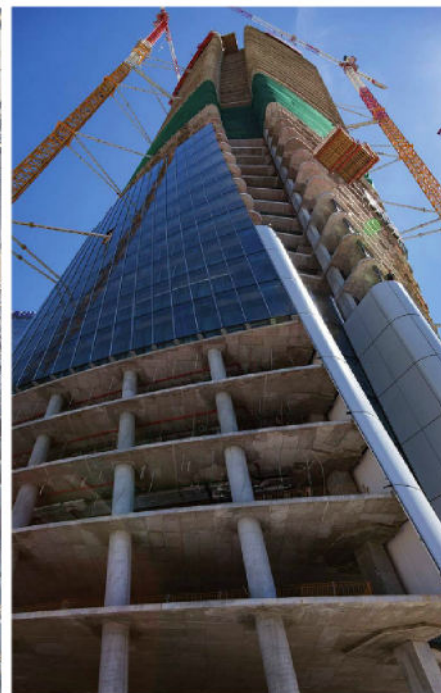
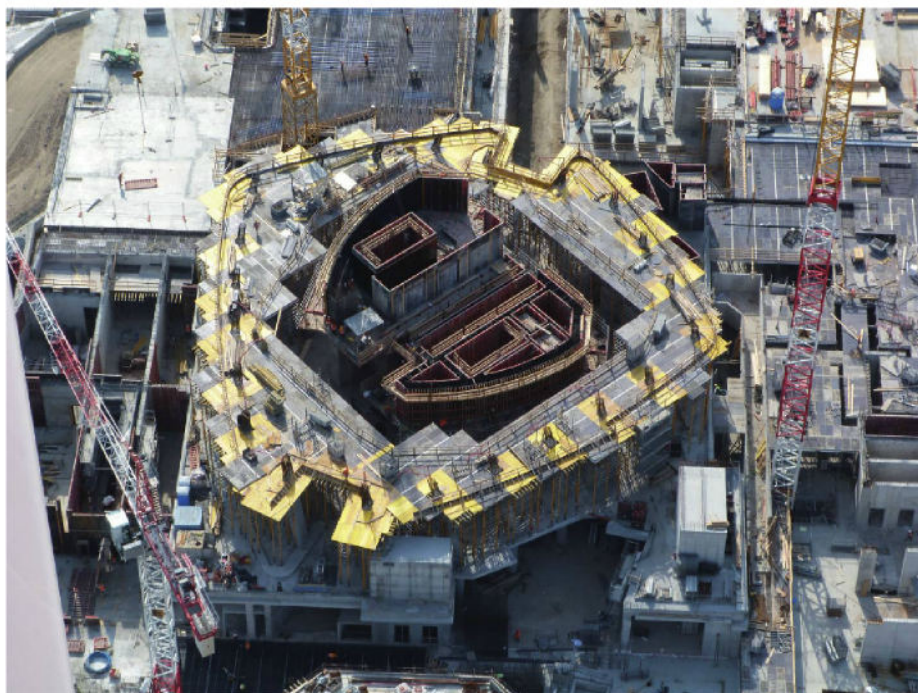


LA TORRE DI ZAHA HADID A MILANO

L'approccio per quanto concerne la pelle esterna della TCB tower del complesso CityLife è stato invece differente. La torre TCB, chiamata anche "Torre Hadid" dal nome dell'architetto Zaha Hadid, è tuttora in fase di costruzione nella zona "CityLife" nel centro di Milano. Il complesso TCB consiste di due parti: una torre di 43 piani e un padiglione commerciale (facente parte anch'esso del progetto Hadid) posto alla base della torre. Il piano interrato comprende garage, locali tecnici e magazzini. La facciata principale è costituita da un involucro vetrato che segue la geometria in torsione dell'edificio. All'interno di questo, due profondi tagli, diametralmente opposti rispetto al nucleo centrale, individuano gli ingressi, mentre dai livelli uffici incorniciano le viste preferenziali della città e del paesaggio. La geometria della torre è controllata da funzioni matematiche che mettono in relazione la quota delle diverse piante con la loro rotazione e la scalatura di alcuni valori caratteristici. Le funzioni di scalatura e rotazione hanno un asintoto verticale oltre il 40° livello. I valori sono maggiori alla base e quasi nulli in alto per porre l'accento verticale della torre. La torre ha un impianto tradizionale di nucleo centrale con scale, ascensori, impianti e servizi e corona di pilastri, posti sul bordo sul perimetro del solaio, e che seguono l'andamento geometrico della torre. La geometria del nucleo centrale garantisce la massima efficienza sia strutturale sia impiantistica nonché distributiva degli uffici in una stringente logica costruttiva.

La pelle esterna (un sistema di facciata a celle) definisce la forma dell'edificio ed è costituito da vetri di forma irregolare e non planari. La pelle interna (un sistema di facciate a cellule da pavimento a soffitto) segue una forma sfaccettata a gradoni

Hadid Tower, Zaha Hadid, Milano.
Render della torre.



che approssima la forma fluida esterna della torre. Questa approssimazione della pelle interna permette l'uso di cellule standard, generalmente rettangolari. Ciascuno dei due fianchi è diviso in due parti da una zona caratterizzata da una maggiore curvatura della forma architettonica, dove è richiesto l'impiego di elementi di vetro curvato a caldo. La pelle esterna e la pelle interna sono separate e differenti, sia per geometria che per prestazioni. L'involucro edilizio è pertanto una facciata a doppia pelle a ventilazione naturale di tipo esterno-esterno. L'aria entra dal traverso inferiore della pelle esterna ed è libera di circolare nell'intercapedine di piano (in realtà vista la presenza del "cut" l'aria è libera di circolare solo per metà piano). Il giunto orizzontale è stato progettato per assicurare la ventilazione naturale passiva della cavità. Il passaggio dell'aria è permesso attraverso due feritoie poste sul profilo traverso inferiore di ogni cellula.

La pelle dell'edificio asseconda la geometria solida in torsione che caratterizza la torre. A tal riguardo la facciata esterna si presenta estremamente articolata, mentre quella interna ha una geometria regolare. La pelle interna sfaccettata, va da solaio a solaio ed è generalmente realizzata con pannelli rettangolari piani di larghezza costante pari a 1500 mm x 3240 mm, ad eccezione di alcuni pannelli irregolari po-

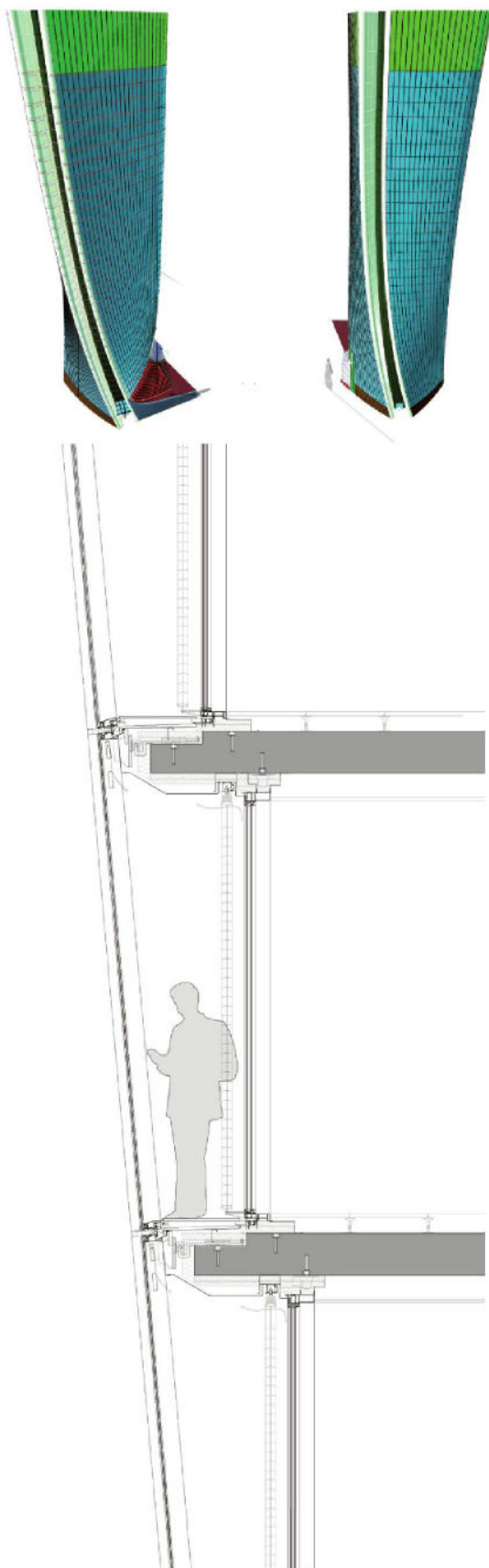
sizionati nelle zone di raccordo e nelle sezioni di interfaccia con l'involucro opaco. La facciata si presenta generalmente ad ante fisse, tranne 4 cellule apribili per piano (2 per ogni lato), che servono per permettere la manutenzione dell'intercapedine. La posizione delle cellule varia ad ogni piano e le cellule non sono mai allineate sul piano verticale. L'angolo del montante delle cellule della pelle interna è generalmente uniforme (e diverso da 180°) ma esistono alcuni punti di discontinuità in corrispondenza delle zone "snodo". La larghezza dell'intercapedine cambia al variare dell'inclinazione delle cellule e al variare dell'altezza dell'edificio, da un minimo di 65 cm ad un massimo di 150 cm. La pelle esterna seguendo la superficie geometrica in torsione della torre è caratterizzata da cellule di geometria quadrilatera irregolare, di forma diversa al variare della loro posizione, e non ripetibile lungo l'edificio. Per seguire la torsione della torre le cellule di facciata hanno inclinazione verticale sempre diversa, variabile lungo il perimetro della pianta e salendo con l'altezza dell'edificio e formano un angolo sempre diverso l'una con l'altra. I pannelli della pelle esterna nella zona "di snodo" (zona centrale dei due lati in cui viene suddiviso l'edificio) sono stati progettati come pannelli quadrilateri di vetro curvato a caldo (la geometria dell'edificio, infatti, richiedeva una

In alto sopra a sinistra.
Hadid Tower, Zaha Hadid, Milano.
Fase di costruzione.

In alto sopra a destra.
Hadid Tower, Zaha Hadid, Milano.
Fase di costruzione dell'involucro di facciata.

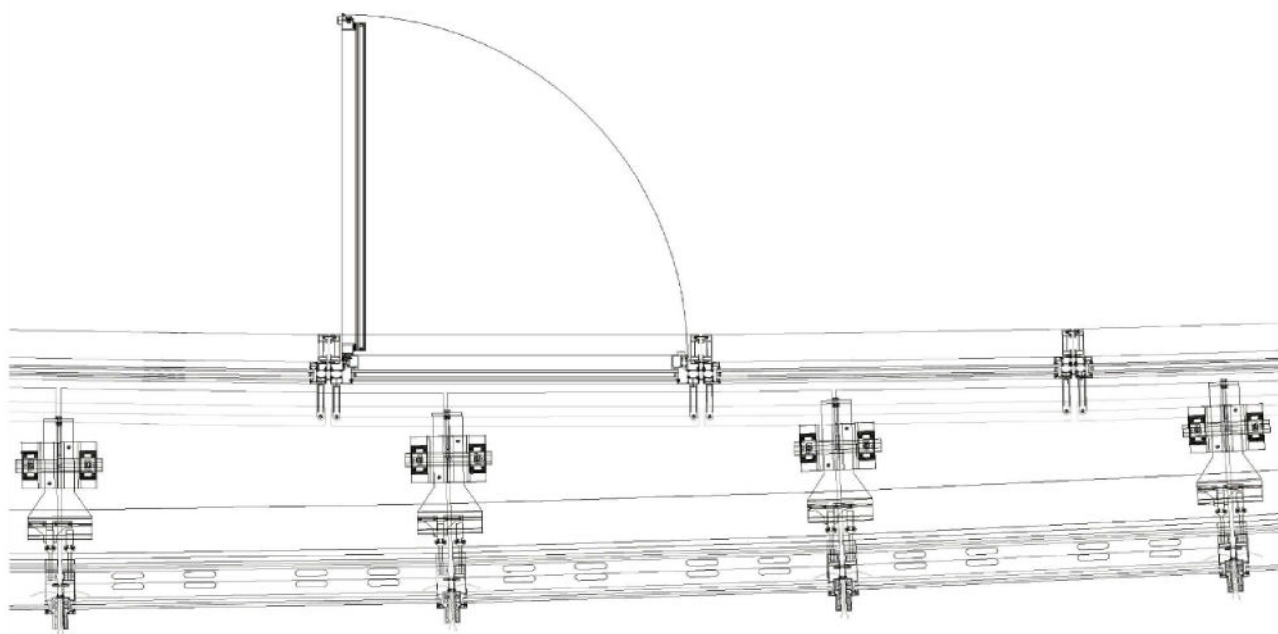
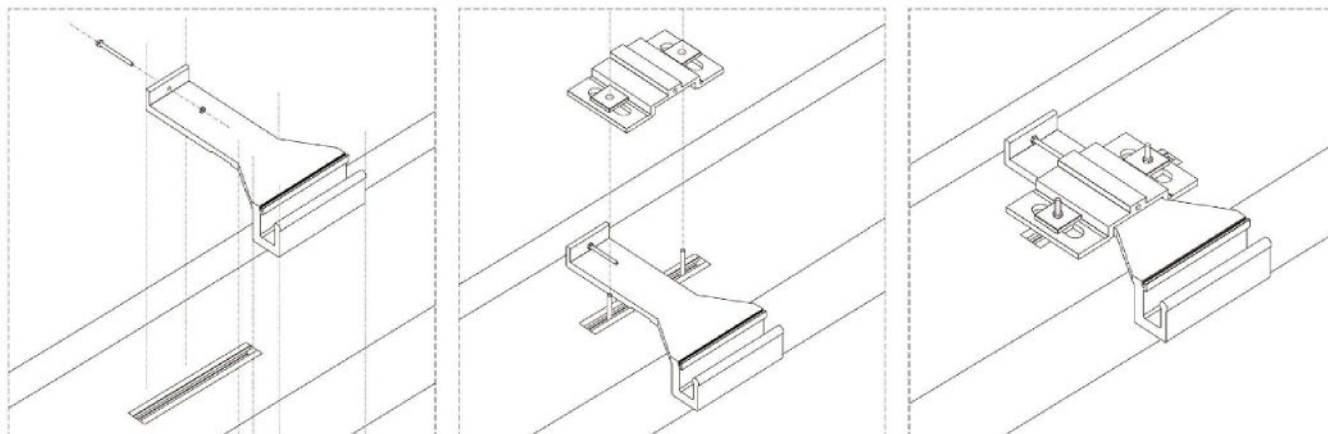
In alto a destra, Hadid Tower, Zaha Hadid, Milano. Modellazione involucro.

A fianco, Hadid Tower, Zaha Hadid, Milano. Sezione verticale dell'involucro di facciata.



curvatura troppo elevata per questi pannelli, che non poteva essere realizzata con una piegatura a freddo). Lo sviluppo del progetto esecutivo della facciata ha seguito i punti cardine con il quale essa è stata concepita nel progetto definitivo per risolverne le criticità e svilupparne una soluzione "ad hoc" in grado di garantire le migliori prestazioni. Per questo lo sviluppo del progetto esecutivo è stato coordinato al fine del raggiungimento i seguenti obiettivi: qualità estetica e funzionale della soluzione; durabilità nel tempo della stessa; rispetto dei requisiti prestazionali previsti a capitolato; rispetto della normativa vigente e degli standard di sicurezza per la posa in opera; rispetto dei requisiti di tutela ambientale nell'uso dei materiali; ottimizzazione delle risorse; velocità e semplicità di posa in opera; rispetto dei requisiti estetici coordinati dalla Direzione Artistica dello Studio Zaha Hadid Architects. Il primo passo verso l'ingegnerizzazione della soluzione è stato compiuto con la scelta della tipologia di piegatura a freddo dei vetri, ma prima ancora di questa, con la verifica della fattibilità di tale soluzione. Il progetto prevede la realizzazione di cellule di facciata caratterizzate da una doppia curvatura, a formare una geometria solida di paraboloide iperbolico. Come descritto in precedenza, realizzare questo tipo di geometria può condurre a fenomeni di instabilità (il fenomeno si verifica solo per pannelli vincolati puntualmente sui quattro angoli) delle lastre e deve essere, quindi, attentamente valutato. Tale fenomeno potrebbe comportare tra l'altro riflessioni luminose indesiderate della superficie del vetro, accentuate dalla presenza di coating. La valutazione di tali fenomeni è stata effettuata tramite l'applicazione della formula riportata nella teoria di Staaks, tratta dalla modellazione FEA (Finite Elements Analysis). Determinato che i possibili fenomeni d'instabilità delle lastre non costituivano un problema sono state analizzate le possibili alternative per l'applicazione della piegatura a freddo alle lastre. L'impiego di pannelli privi di telaio (piegati quindi liberamente e che comportano una minore sollecitazione sulle lastre) è stato escluso in quanto sarebbe stato necessario un sistema di tenuta supplementare per resistere ai carichi del vento. La valutazione si è quindi ristretta a due soluzioni possibili: piegare i pannelli in fase di produzione (pre-warp panels) oppure piegare i pannelli insieme al telaio in opera (restrained warp panels). La prima ipotesi comportava l'esecuzione dell'intero processo in stabilimento attraverso una piegatura libera dei pannelli di vetro, vincolati successivamente ai telai calandrati in precedenza. Tale soluzione è stata scartata in quanto avrebbe comportato maggiori costi (dovuti alla calandratura sempre diversa dei profili), tutti differenti tra loro, e tempi di produzione più elevati (dovuti all'assemblaggio a posteriori del vetro all'interno dei profili calandrati e all'accurato controllo delle curvature differenti per ogni cellula). La seconda soluzione è stata preferita poiché caratterizzata da minori costi e tempi di realizzazione (giacché le cellule vengono fabbricate piane e piegate in opera), nonché dalla possibilità di aggiustamenti in opera della facciata, indispensabili vista la complessità della stessa.

Uno dei punti cardine per la realizzazione di questa particolare geometria di facciata è sicuramente identificabile nella staffa di aggancio della facciata al solaio,

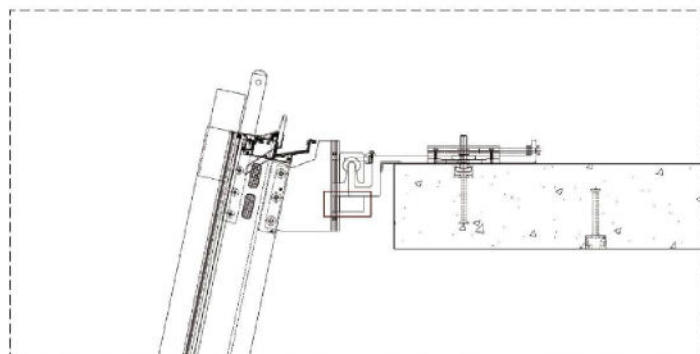
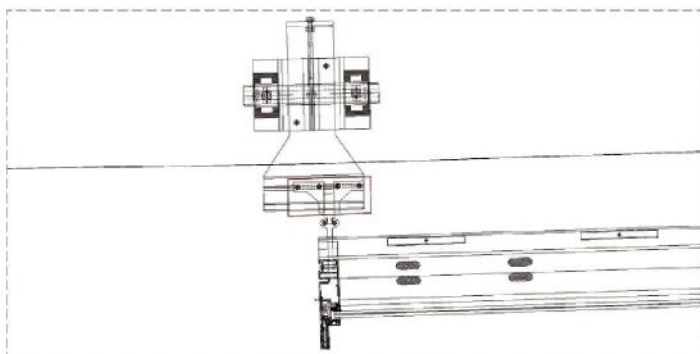
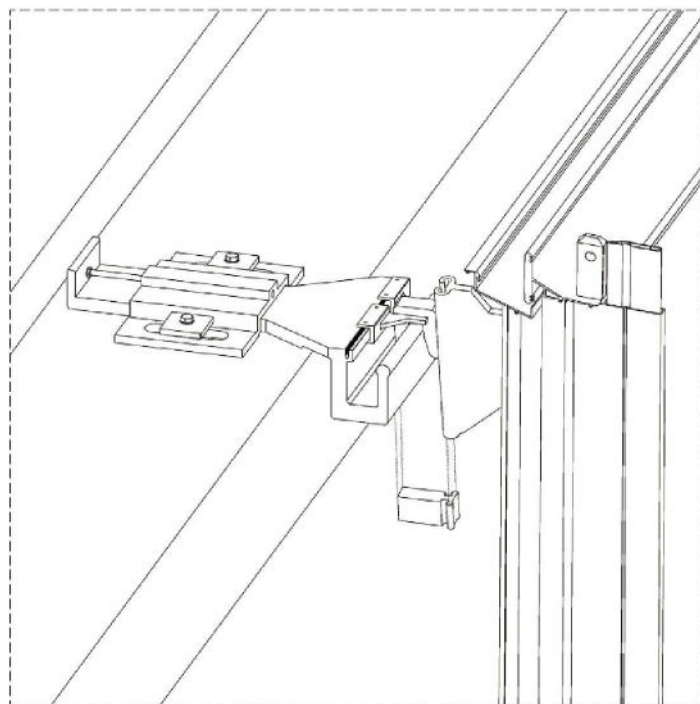
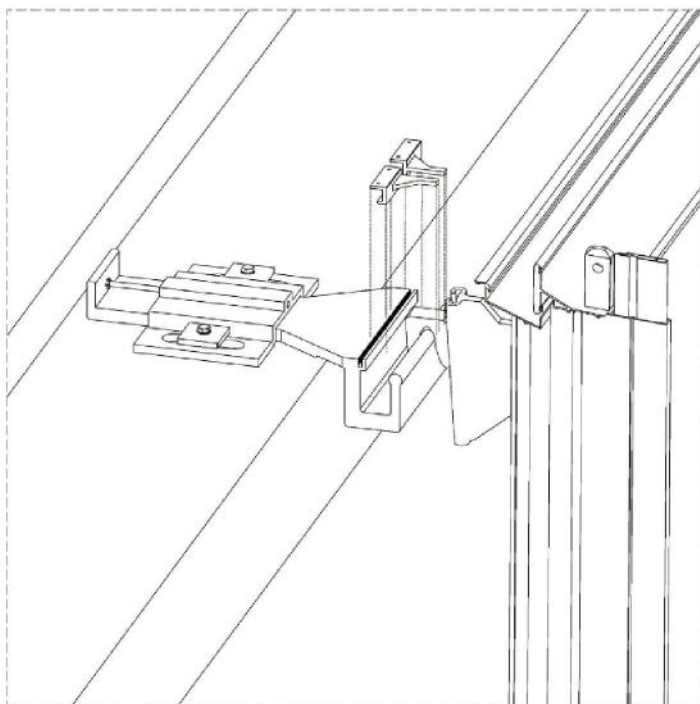


in quanto questa deve permettere un posizionamento a rotazione variabile sia in altezza che sul piano orizzontale, pur mantenendo la possibilità di piegare a freddo la cellula. Viste le criticità e la particolare geometria della facciata si è ritenuto opportuno guidare i progettisti nella realizzazione di una staffa che permettesse le regolazioni in opera al fine di compensare le tolleranze dei vari elementi nonché una agevole operazione di cold bending della cellula. In particolare, la staffa di fissaggio progettata è composta dai seguenti elementi: staffa su montante o "slitta"; uncino; staffa a solaio o "mensola"; staffa "ponte"; staffa di ritegno

orizzontale. La prima staffa è ancorata al montante ed è predisposta a forma di "slitta" per permettere all'uncino di scorrervi all'interno e garantire una regolazione in altezza della cellula. L'uncino è bloccato in posizione attraverso apposito grano di fissaggio e si ancora alla staffa a solaio appositamente sagomata per permetterne il suo inserimento. Questo ancoraggio permette delle rotazioni fra uncino e staffa, così che anche le cellule che presentano montanti obliqui possono essere ancorate senza particolari problemi. La staffa "ponte" passa al di sopra della staffa "mensola" e si ancora ai profili di ancoraggio annegati nel solaio

In alto, Hadid Tower, Zaha Hadid, Milano. Sequenza di montaggio delle celle della pelle esterna.

Hadid Tower, Zaha Hadid, Milano. Sezione orizzontale dell'involucro di facciata.



In alto, Hadid Tower, Zaha Hadid, Milano. Sequenza di montaggio delle celle della pelle esterna.

in calcestruzzo armato. Le due staffe sono collegate per mezzo di un'asta autofilettante e permettono la piegatura a freddo in opera del vertice della cellula mediante la trazione esercitata con la rotazione della stessa. La barra filettata permette, quindi, una regolazione dentro/fuori della staffa "mensole". Oltre alla regolazione dovuta per l'azione di cold bending sono permesse le regolazioni in piano sul solaio nelle due direzioni, per compensare le tolleranze di fabbricazione e posa in opera dei vari elementi. Una volta avvenuto il tiraggio in opera della cellula, l'uncino viene bloccato per mezzo di due staffe di ritegno orizzontale, imbullonate alla

staffa a solaio. Tale bloccaggio ha il principale obiettivo di sopperire anche alle azioni orientate lungo il trasverso, associate al carico della BMU (Building Maintenance Unit, di valore pari a 2.85 kN). Un ultimo accessorio, posto a corredo della staffa è una piastra collocata al di sotto della staffa "mensole" e bloccata alla "slitta" che impedisce un eventuale innalzamento della cellula dovuto ai movimenti della struttura. La posa in opera della facciata, con questo nuovo staffaggio consente, oltre ad un preciso posizionamento della cellula (che permette margini di aggiustamento in opera) notevoli risparmi sui tempi d'installazione.