

Parte terza

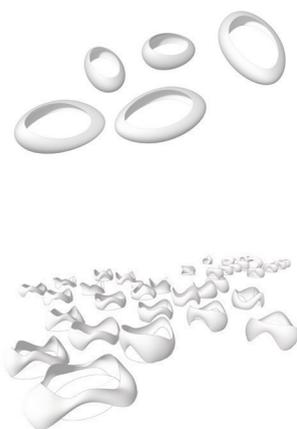
Best practices

7. Sistema discreto autoportante: i *Cocoon pavilions*

Il tema della discretizzazione di superfici curve per l'architettura e il *design* è finalizzato ad individuare e sistematizzare i processi geometrici necessari per la progettazione ottimizzata di forme complesse.

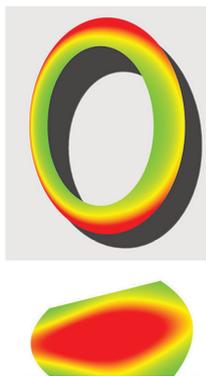
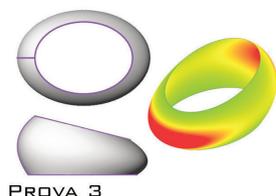
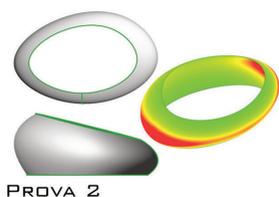
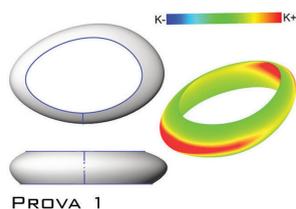
Al fine di raggiungere tale obiettivo è fondamentale applicare la teoria all'esperienza concreta favorendo la collaborazione tra modo accademico, centri di ricerca specializzati e aziende. Oggetto dell'applicazione di parte dei contenuti teorici sistematizzati nei capitoli precedenti sono le due versioni di padiglione autoportante: il *Cocoon Temporary Pavilion* e il *Cocoon Evo Pavilion*. Entrambe le soluzioni sono state fisicamente realizzate discretizzando una superficie-involucro a doppia curvatura in pannelli esagonali piani.

La costruzione del *Cocoon Temporary Pavilion* è avvenuta in occasione del *workshop gh_to Fabrication* tenutosi nel maggio 2013 presso il *Mediterranean Fab Lab* di Cava De Tirreni e promosso dal centro di ricer-



Figg. 1, 2/ Ricerca di forme complesse con curvatura gaussiana positiva per la realizzazione di un involucro complesso discretizzato in pannelli esagonali piani convessi. (Rielaborazione dell'autore).

Shaping & Paneling



che *Medaarch* (Accademia Mediterranea d'Architettura)¹ e dal centro di ricerche *Co-de-iT (Computational Design Italy)*²: l'evento ha rappresentato un'importante attività di ricerca applicata per la risoluzione delle problematiche connesse alla modellazione, discretizzazione e costruzione di un involucro complesso.

Il *Cocoon Temporary Pavilion* ha una struttura ad anello realizzata congiungendo insieme 231 pannelli esagonali piani in cartone ondulato che, come in un mosaico tridimensionale, compongono un "bozzolo" largo circa 7 metri e alto poco più di 3 metri.

I tutor, gli architetti Amleto Picerno Ceraso³ e Andrea Graziano⁴ hanno guidato un *team* composto dai membri del *Fab Lab* e da un gruppo eterogeneo di architetti ed ingegneri⁵ attraverso le fasi di *computational design* (elaborazione della definizione per il *Paneling* esagonale piano dell'involucro) e *Digital Fabrication* della struttura. Ad oggi, la realizzazione di forme complesse mediante tassellazione in esagoni piani vanta un numero limitato di sperimentazioni completate da un risultato concreto.

L'applicazione è stato sviluppata mirando alla realizzazione di un sistema autoportante, dunque finalizzato all'ottimizzazione dei costi di produzione e dei tempi di fabbricazione e montaggio. L'intero processo è stato suddiviso in quattro fasi: *shaping* (ricerca formale), *Paneling* (discretizzazione e planarizzazione), *gravity test* (verifica statico-cinematica del sistema), *digital fabrication* e montaggio. Il numero complessivo e la dimensione degli elementi distribuiti sulla superficie influiscono inevitabilmente sulla ricerca dell'equilibrio dei vertici delle celle sghembe in fase di planarizzazione, sul comportamento statico dell'intero manufatto, sui tempi di taglio, di assemblaggio, sul numero e sulla tipologia degli elementi di connessione: in sintesi, sul conseguente grado di approssimazione della forma di origine. La ricerca dell'equilibrio statico ha rappresentato uno degli

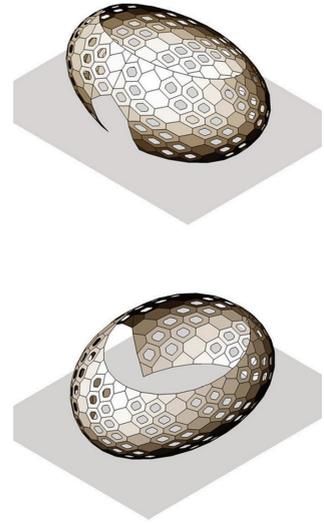
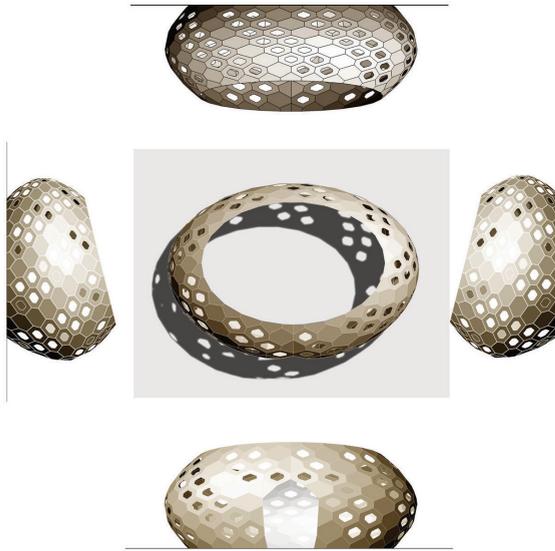
1 Medaarch.com/

2 Co-de-it.com/

3 Architetto, CEO presso *Medaarch* e *Mediterranean FabLab*.

4 Architetto, computational designer, digital explorer, è co-founder di *Co-de-iT (Computational Design Italy)*.

5 Il gruppo che ha collaborato con i membri del *Mediterranean FabLab* alla realizzazione del padiglione è composto da Emanuela Lanzara, Antonia Gravagnuolo, Amedeo Di Marco, Daniela Scovotto, Gessica Fiorillo, Alessio Palmieri.



obiettivi principali dell'intero processo: la reale sfida consisteva nel creare un oggetto di media scala discretizzato in elementi esagonali convessi ma soprattutto autoportante. Lo *shaping* dell'involucro è stato affrontato puntando alla ricerca delle condizioni geometrico - formali idonee a consentire la planarizzazione delle porzioni di superficie delimitate da celle esagonali sghembe in esagoni piani convessi. L'idoneità di tutte le forme modellate è stata puntualmente verificata attraverso la diagnosi della curvatura gaussiana di ciascuna delle soluzioni (fig. 3). La soluzione finale (figg. 4, 5) è dunque rappresentata da un anello le cui dimensioni sono pari a 7,17 m × 5,13 m × 3,10 m. A tale proposito, ai fini compositivi e di ricerca formale, è utile evidenziare la somiglianza della soluzione selezionata con alcune superfici analitiche note, tra cui il toro e le cicliidi⁶. L'uso di superfici che derivano da una genesi geometrica definita induce a riflettere sulla possibilità di utilizzare e fondere geometrie note per simulare o ricavare forme complesse allo scopo di veicolare la discretizzazione e conseguente realizzazione.

Fig. 3/ A pagina precedente: *Shaping* e soluzione finale della superficie a curvatura prevalentemente positiva: è interessante ed utile, ai fini compositivi, evidenziare la somiglianza della forma ottenuta con alcune superfici analitiche, tra cui il toro e le cicliidi. (Elaborazione dell'autore)

Figg. 4, 5/ Forma finale dell'involucro discretizzato in elementi esagonali opiani convessi (Elaborazione dell'autore).

6 Le Cicliidi di Dupin sono particolari superfici quartiche e derivano dall'involuppo di tutte le sfere tangenti a tre sfere fisse, oppure sono generate dall'involuppo di sfere con centri su una conica e tangenti ad una sfera fissa. Le linee di curvatura sono cerchi o linee rette. Un esempio semplice di Ciclide è il Toro generico. A seconda che l'asse intorno a cui ruota il cerchio sia esterno, secante o tangente al cerchio stesso si ottiene un Toro ad anello, a fuso o a corno. Anche la Sfera è un esempio di Ciclide - <http://www-dimat.unipv.it/~olivati/IV-4-14/IV-4-14.html>

Shaping & Paneling

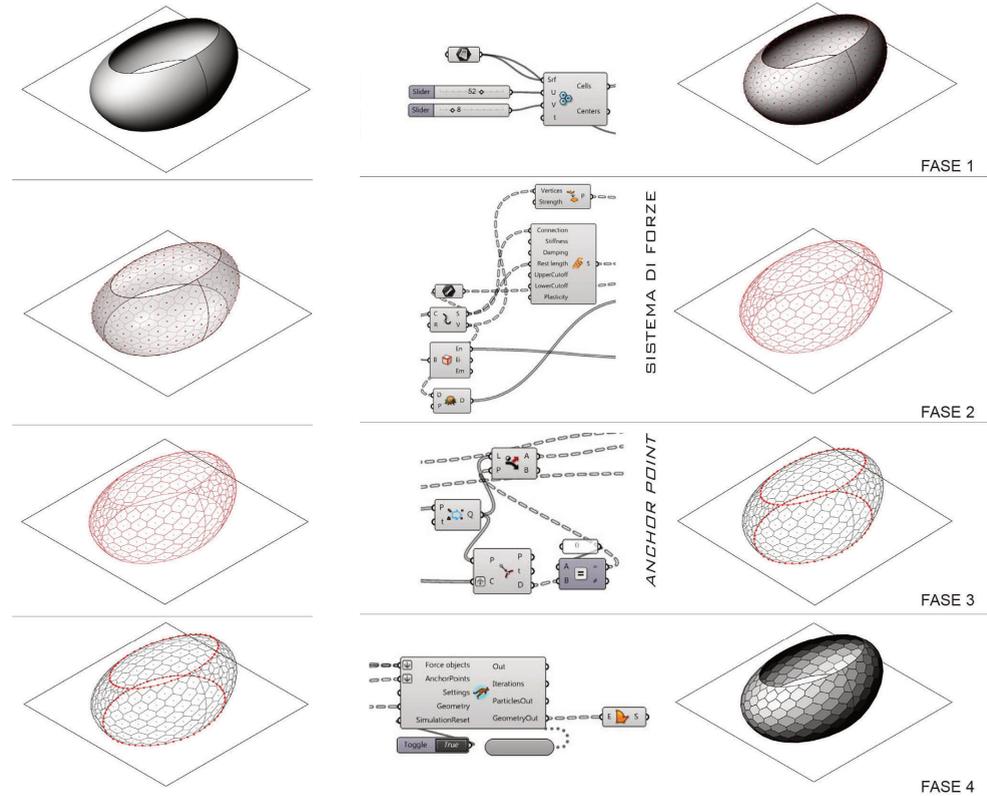


Fig. 6/ *Planar Hexagonal paneling*; steps della definizione algoritmico-generativa per la distribuzione delle celle esagonali sghembe sull'involucro, ancoraggio della superficie lungo i bordi, perturbazione dei vertici e planarizzazione delle celle. (*Kangaroo Physics* by Daniel Picker 2013). (Definizione by *Co - de - iT - Medaarch* - Elaborazione dell'autore)

Le 231 celle esagonali sghembe sono state distribuite sulla superficie mediante l'utilizzo dell'*add-on Lunch Box* (Miller 2012 - *Grasshopper, McNeel*).

Il componente-forza *planarize* dell'*add-on Kangaroo* (Picker 2013 - *Grasshopper, McNeel*) consente di imporre e computare la complanarità dei bordi delle celle, gli *honeycomb edges*, distribuiti sulla superficie (fig. 6). Tale condizione di planarità è necessaria per procedere alla fase successiva del taglio dei pannelli. Numerosi aspetti influenzano il calcolo del processo di planarizzazione, primo tra tutti la curvatura della superficie. Per estrarre delle celle esagonali piane e convesse è necessario distribuire e planarizzare il *pattern* su una superficie a curvatura gaussiana prevalentemente positiva. Segue l'individuazione degli elementi di ancoraggio, il controllo delle tol-

leranze, il numero e le dimensioni delle celle esagonali. Per planarizzare gli *honeycomb edges* è stata utilizzata una definizione algoritmico-generativa ideata da *Co-de-It* e da *Medaarch* sulla base degli esperimenti condotti da Daniel Piker sul tema⁷. Il *Cocoon Temporary Pavilion*, prototipo pensato per un ambiente *indoor*, è stato realizzato in cartone ondulato, materiale completamente riciclabile e biodegradabile. Il cartone scelto per la fabbricazione dei pannelli è il tipo a tripla onda, dello spessore di 14 mm e colore *Havana*. Dopo avere eseguito il *numbering* (numerazione) dei tasselli è stato necessario progettare il sistema di assemblaggio realizzando delle alette lungo i bordi di ciascun esagono. Le alette, opportunamente piegate e forate, consentono l'unione dei pannelli adiacenti attraverso l'uso di semplici fascette in plastica (fig.7). Segue la fase di *nesting* dei pannelli (distribuzione ottimizzata degli elementi piani sui pannelli di materiale da sottoporre a taglio) eseguita utilizzando il plug-in *Rhionest (Rhinoseros, McNeel)* (fig.8). Per la fabbricazione dei pannelli è stata coinvolta un'azienda locale, la *CRTS Cartotecnica*⁸. In totale, sono stati necessari 83 fogli di cartone ondulato per ottimizzare la distribuzione dei 231 pezzi. La *milling cutter* usata per il taglio è dotata di un piano di dimensioni 200cm x 200 cm, punta seghettante e cambio utensile manuale e consente di effettuare cordonatura e tagli a 45°. Queste opzioni consentono di effettuare il tipo di incisione necessaria per piegare e congiungere le alette distribuite intorno all'intero perimetro dei pannelli adiacenti. Il tempo totale necessario per il taglio di tutti i pannelli, pieni e forati, è stato pari a 4 ore e 20 minuti⁹. Per montare il padiglione sono stati necessari 1500 fascette in plastica, 1500 anelli metallici ed un trapano per forare più agevolmente il cartone (fig. 9). Per completare l'assemblaggio sono stati necessari 2 giorni¹⁰.

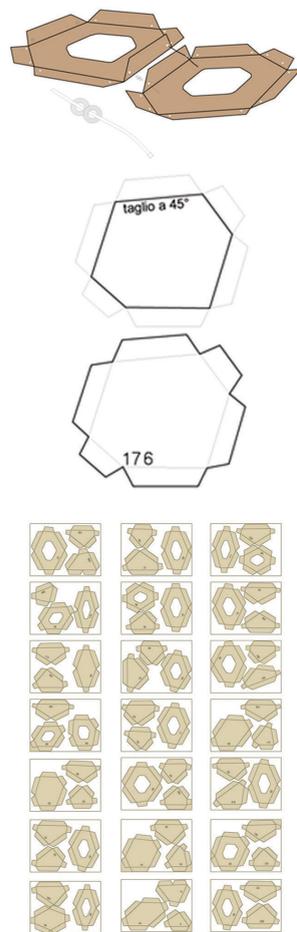


Fig. 7/ Progettazione delle alette per l'assemblaggio.

Fig. 8/ *Nesting* dei tasselli sui pannelli da sottoporre a taglio.

7 Grasshopper3d.com/forum/topics/planar-hexagons-kangaroo.

8 Cartotecnicaarts.com

9 *Cocoon/ A Temporary Pavilion / Medaarch / code.it* - Posted in University / Research - Mediterranean Fab Lab by Mediterranean academy of architecture (8 luglio 2013).

10 *Ibidem*.

Shaping & Paneling

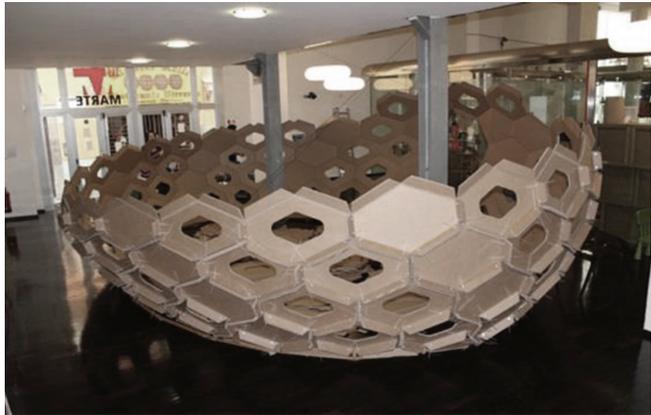
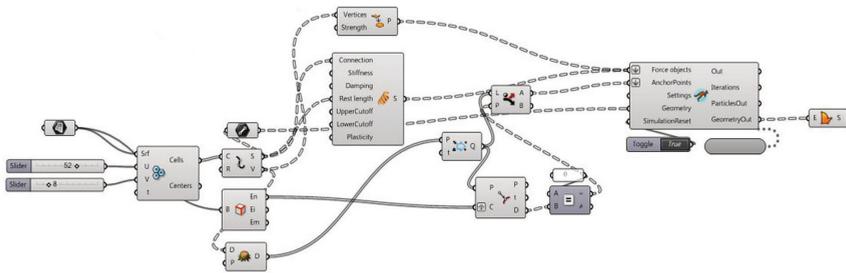
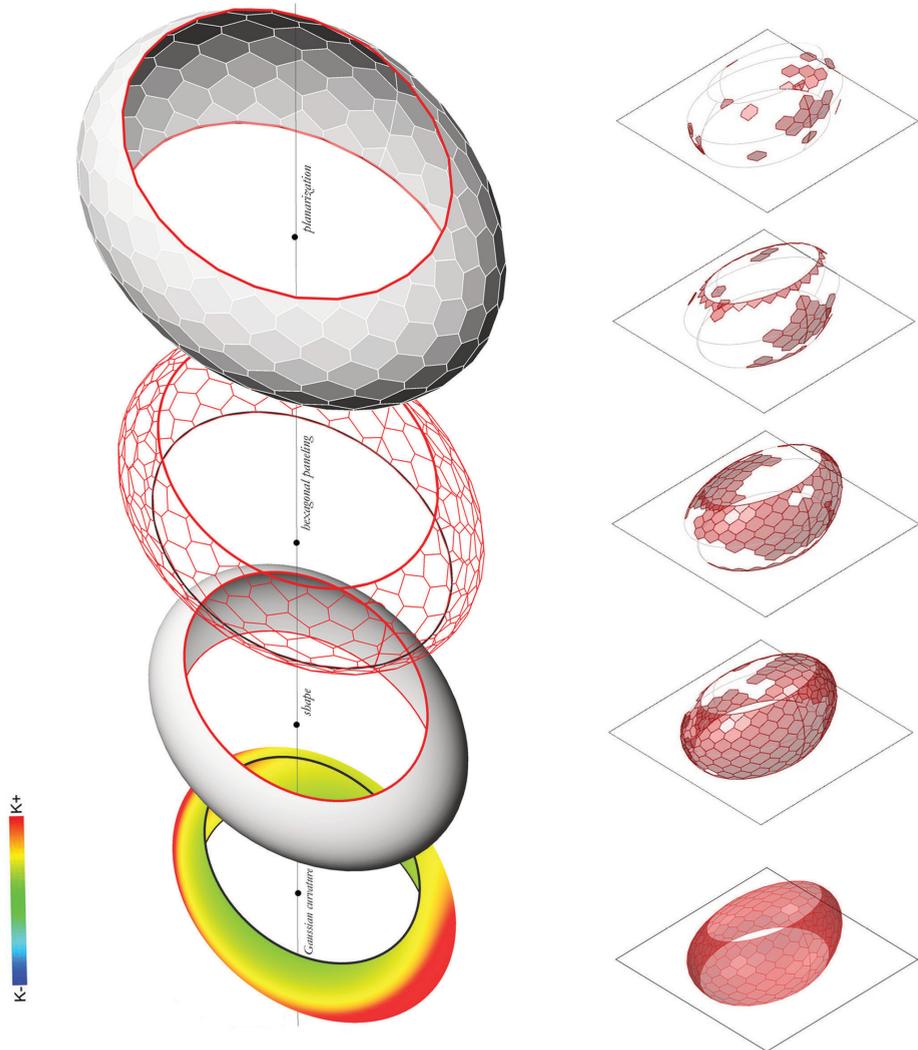


Fig. 9/ Fasi di montaggio del *Cocoon Temporary Pavilion*. (Foto dell'autore).

Fig.10/ A pagina seguente: *shaping & paneling*. la prospettiva mostra la sequenza delle fasi relative alla genesi e discretizzazione della superficie, dallo *shaping* al *paneling* della superficie. Definizione by *Code - iT - Medaarch* - Elaborazione dell'autore



Sistema discreto autoportante: i *Cocoon pavilions*



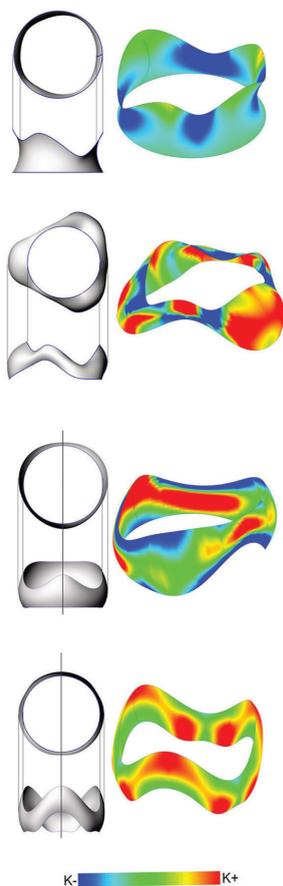


Fig. 11/ *Shaping*: analisi della curvatura gaussiana delle soluzioni generate alla ricerca di una superficie a curvatura prevalentemente positiva. (Elaborazione dell'autore).

Figg. 12, 13/ A pagina seguente: genesi dell'anello originario (*Cocoon Temporary*) e della superficie *sweep* ricavata dalla trasformazione delle curve (*Cocoon Evo*): in nero, le due curve binario; in rosso, la curva sezione. (Elaborazione dell'autore).

11 Teklaweb.eu/

12 Co-de-it, *Cocoon Evo Pavilion*, (4 ottobre 2010).

www.co-de-it.com/wordpress/cocoon-evo-pavilion.html, p.2.

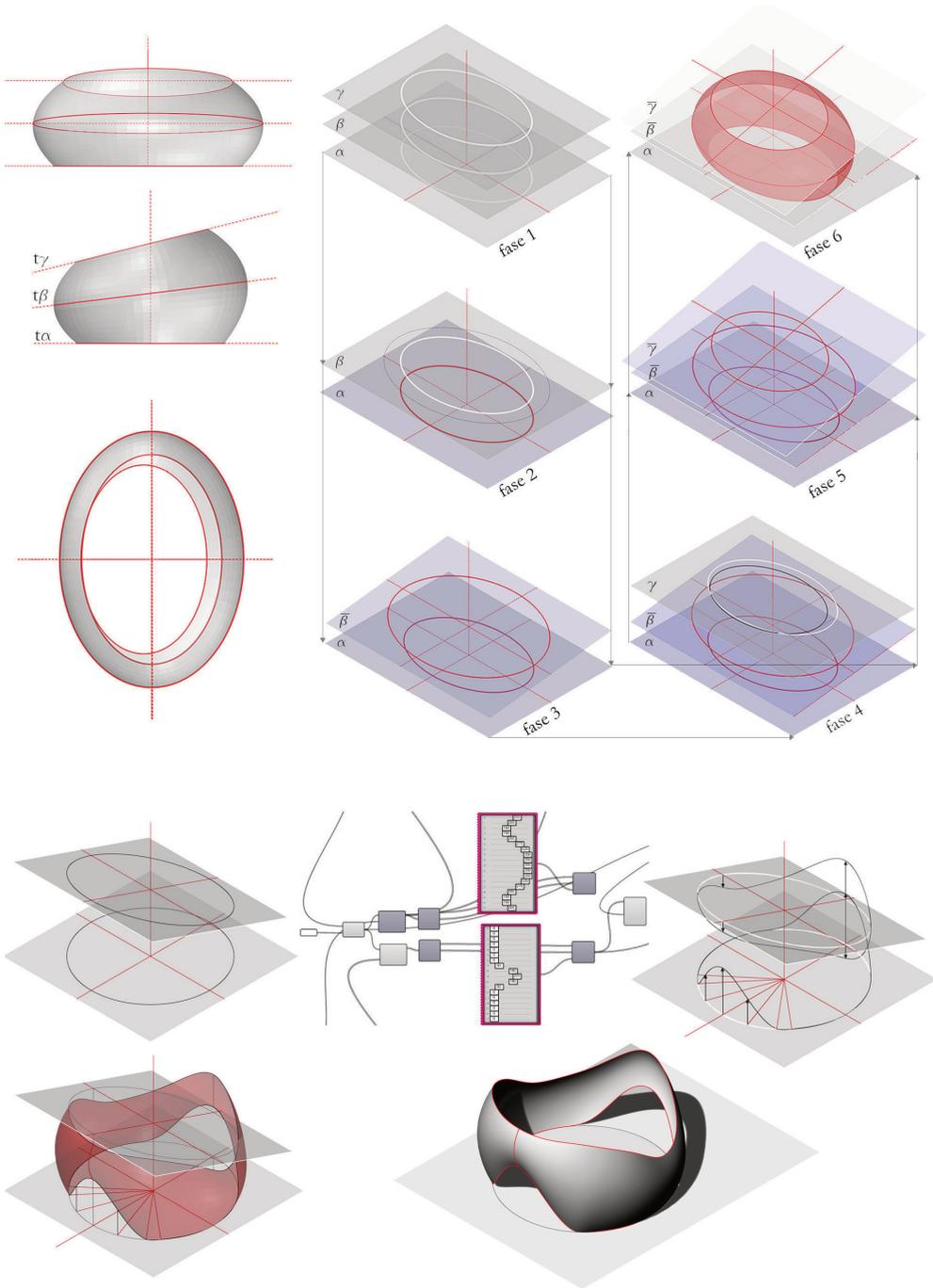
13 *Ibidem*.

Il *Cocoon Evo Pavilion* rappresenta l'evoluzione del *Cocoon Temporary Pavilion*, ed è l'esito della ricerca proseguita dai due centri di ricerca allo scopo di migliorare i risultati ottenuti dalle fasi di progettazione, produzione, fabbricazione e assemblaggio del primo prototipo. Per la realizzazione del padiglione è stata coinvolta un'altra azienda campana, la TEKLA s.r.l.¹¹. In questo caso, la forma del padiglione è stata modellata considerando preventivamente la necessità di inserire due varchi di passaggio lungo l'asse di simmetria della struttura. Come per il *Cocoon Temporary Pavilion*, il primo passo è stato quello di testare differenti configurazioni formali valutandone la validità in termini di curvatura (fig. 11).

La forma della superficie è stata trasformata deformando le due ellissi di bordo superiore ed inferiore utilizzate per il primo prototipo (figg. 12, 13). Sempre attraverso l'utilizzo degli add-on *Lunch Box* e *Kangaroo* sono state imposte le condizioni necessarie per computare la planarizzazione delle varie soluzioni di *Paneling* testate. In particolare, come nel caso precedente, per tutte le soluzioni ottenute sono stati confrontati i dati relativi al numero di iterazioni necessarie per completare il processo di planarizzazione, il numero dei pezzi, il risultato in termini di qualità della planarità di tutte le superfici, la deformazione di ciascuno dei tasselli, l'approssimazione della superficie iniziale, il peso e la dimensione massima del numero finale di elementi. Il risultato di questa serie di valutazioni è un modello caratterizzato da una suddivisione *Honeycomb* di $80u \times 8v$, per un totale di 360 pannelli. La superficie totale dell'involucro è pari a 50,31 mq¹². Quindi, anche in questo caso è stata eseguita una pre-valutazione del comportamento strutturale del sistema sottoposta all'azione del peso proprio allo scopo di verificare la natura e l'intensità delle deformazioni che questo subiva¹³.

Per ottenere delle prestazioni qualitativamente

Sistema discreto autoportante: i *Cocoon pavilions*



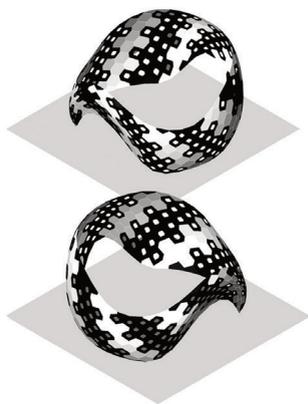
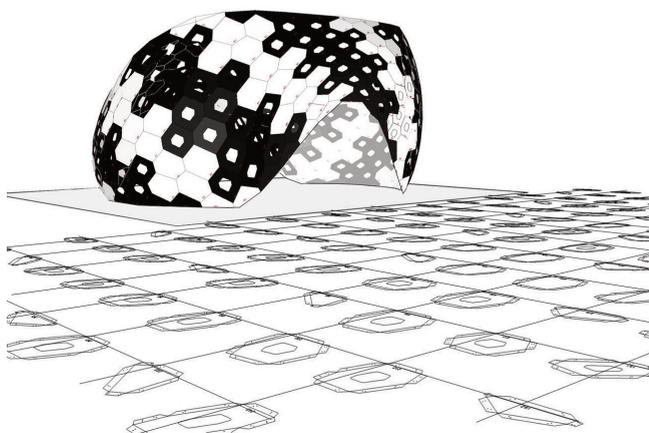
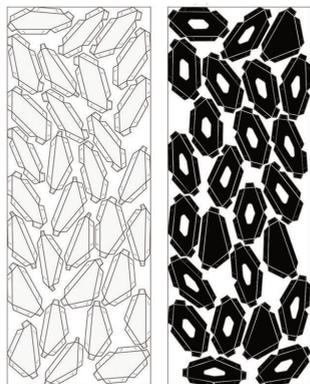


Fig. 14/ *Nesting* dei pannelli.
(Elaborazione dell'autore).

Fig. 15/ Dettaglio delle alette
e sistema di fissaggio per
l'assemblaggio dei pannelli.
(Elaborazione dell'autore).

Fig. 16/ Il *Cocoon Evo Pavilion*. Viste
assonometriche del modello digitale
finale. (Elaborazione dell'autore).

14 Elval-colour.com/en/products-etalbond, p. 1.

15 Co-de-it.com/wordpress/cocoon-evo-pavilion.html, p.2.

16 Medaarch.com/

17 *Ibidem*, p.5.

superiori rispetto al caso precedentemente mostrato è stato testato un materiale differente. Per fabbricare i pannelli è stato scelto l'*Etalbond PE White/Black*¹⁴, materiale composito rigido, leggero e resistente, disponibile in diversi colori.

Successivamente alla fase di *nesting* dei 360 pannelli su pannelli di *Etalbond* di dimensioni pari a 4 x 1500 x 4000 mm (fig. 14), il taglio degli elementi è stato effettuato utilizzando una *milling cutter* a 3 assi di piano 400 cm x 150 cm¹⁵. Il tempo totale necessario per il taglio di tutti i pezzi è stato di 24 ore, divise in 3 giorni¹⁶.

Per fabbricare il numero complessivo di pannelli sono stati necessari 65 mq di materiale divisi per un numero di 18 fogli con una percentuale di utilizzo effettivo di materiale del 68% e quindi con uno scarto di materiale pari al 32%. Il peso totale del padiglione è di circa 250 kg¹⁷.

Grazie alla duttilità del materiale è stato possibile realizzare il sistema di giunzione dei pannelli sfruttando la stessa soluzione sperimentata per il *Cocoon Temporary Pavilion*, cioè tramite semplice piegatura delle alette realizzate lungo i bordi dei pannelli esagonali (figg. 17-20). Su ognuna delle alette sono



stati quindi realizzati quattro fori per l'alloggiamento dei dadi e dei bulloni necessari per assicurare l'adesione tra i pezzi. In particolare, sono stati utilizzati bulloni e relativi dadi tipo M-8, di diametro 5 mm, lunghezza 16 cm

Anche in questo caso per il montaggio dei pezzi è stato necessario posizionare prima gli esagoni del primo giro di base e poi procedere con il completamento di tutti i giri successivi in modo da consentire la chiusura dell'anello. Il padiglione è stato ancorato alla base con un sistema di piattine in acciaio necessarie per fissare le alette di bordo della prima fila di esagoni adiacenti al suolo.

Il montaggio del padiglione è stato effettuato in 3 giorni, da tre persone, per un tempo quotidiano di 8 ore di lavoro¹⁸. È interessante sottolineare che le alette del *Cocoon Evo Pavilion* sono state piegate verso l'interno. Questo accorgimento consente di ottenere una superficie discreta capace di approssimare la forma complessa progettata conferendo maggiore continuità all'involucro finale.

I casi descritti rappresentano un perfetto esempio di applicazione delle conoscenze teoriche affrontate nei capitoli precedenti.

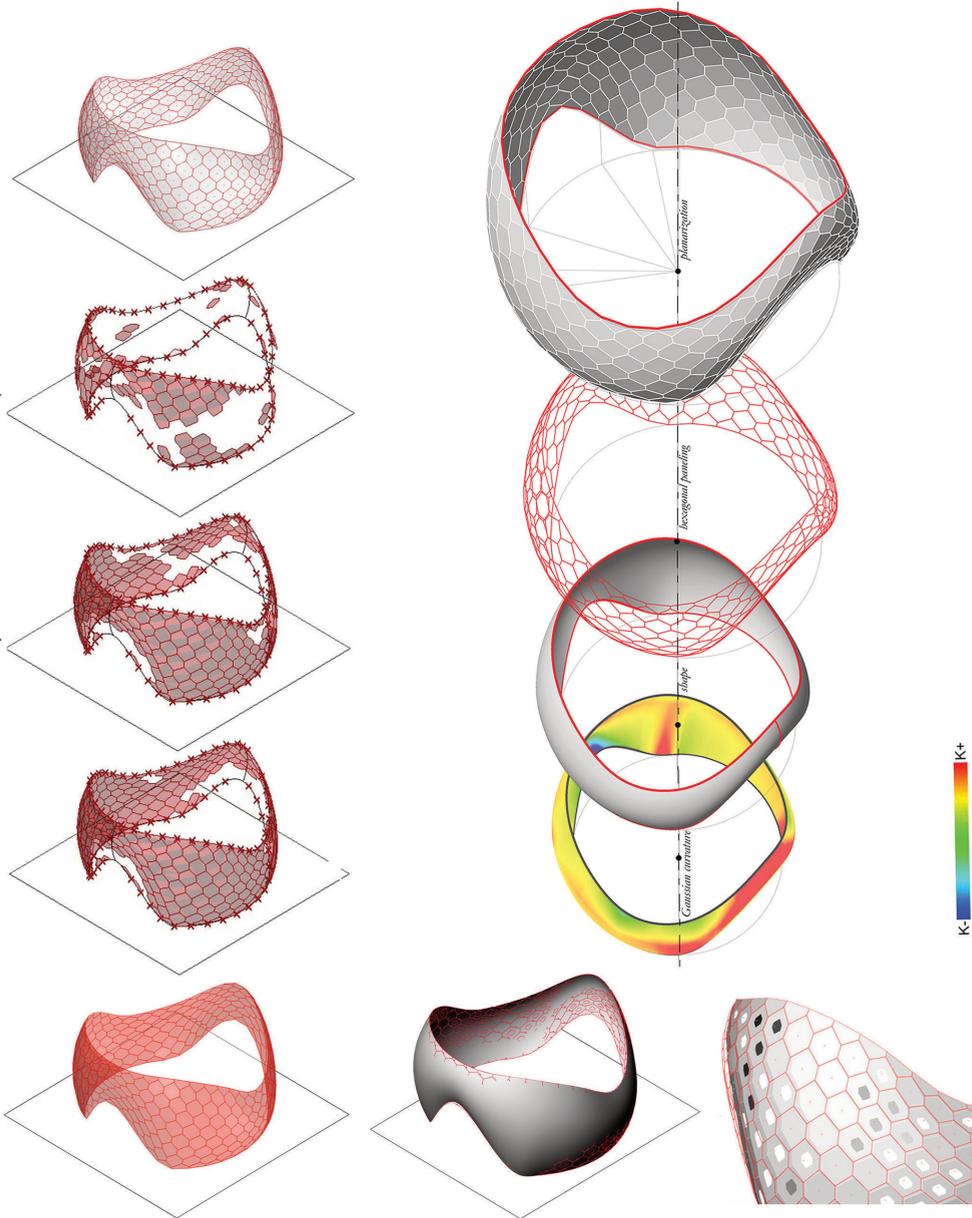


Figg.17-20/ Il *Cocoon Evo Pavilion*. Vista di insieme e particolari. (Foto dell'autore).

Fig. 21/ A pagina seguente: la prospettiva mostra la sequenza delle fasi relative alla genesi e discretizzazione della superficie, dallo *shaping* al *paneling*. (Elaborazione dell'autore).

18 Il *Cocoon Evo Pavilion* è stato montato in occasione della *Maker Faire Rome* (2013).

Shaping & Paneling



8. Sistema semidiscreto portato: le *Eiffel Tower pavilions façades*

Le facciate degli *Eiffel Tower Pavilions*, progettati dallo studio *Moatti & Riviére architectes* per la ristrutturazione del primo piano della Torre Eiffel rappresentano un caso emblematico di ottimizzazione geometrica e costruttiva di superfici complesse discretizzate con pannelli piani e cilindrici in vetro.

Basato su un approccio geometrico rigoroso, il caso si configura come un esempio completo dal punto di vista teorico e applicativo, capace di soddisfare esigenze architettoniche ed economico-ambientali avanzate in quanto inserito all'interno di un monumento storico prestigioso come la Torre Eiffel (fig. 1). Helmut Pottmann definisce il progetto delle facciate degli *Eiffel Tower Pavilions* «una perfetta realizzazione dei principali risultati attesi dall'approccio ARC (*Architectural Freeform Structures from Single Curved Panels*), una vera e propria lezione di Geometria Differenziale applicata»¹. L'evidente volontà di instaurare un dialogo tra la forma e il contesto rappresenta un elemento caratteristico del progetto che

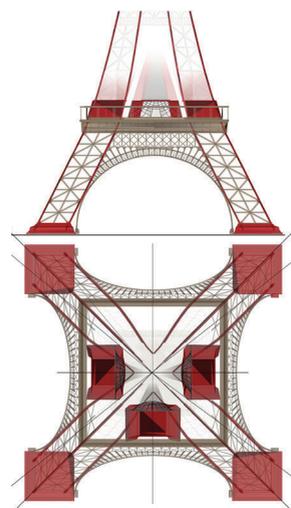


Fig. 1/ Gli Eiffel Tower pavilions. Modello 3D di inserimento dei padiglioni nella Torre. (Disegno dell'autore).

1 Pottmann 2013, p.2



Figg. 2, 3/ I padiglioni e il rapporto con la Torre Eiffel. (Foto dell'autore).

2 L'impresa di costruzione BATEG, coinvolta per la ristrutturazione del primo piano della Torre Eiffel, è una filiale di VINCI Construction France, il principale gruppo di ingegneria civile in Francia.

3 Blog.atcasa.corriere.it/tendenze/2012/08/09/il-nuovo-volto-della-tour-eiffel-in-mostra-alla-biennale-di-architettura-2012/, p. 2.

4 Designboom.com/architecture/eiffel-tower-pavilions-redesigned-by-moatti-riviere-architecture-studio/, p. 2.

offre spunti di riflessione stimolanti ed originali in merito al tema della contestualizzazione delle forme complesse all'interno del patrimonio costruito consolidato. Le forme libere, quasi sempre considerate avulse dall'ambiente nel quale sono inserite, in questo specifico caso si configurano come un elemento di collegamento tra il vecchio ed il nuovo. Inevitabilmente, i vincoli imposti dal contesto veicolano l'intero processo di ideazione formale (figg. 2-6). Le facciate dei nuovi padiglioni seguono l'andamento curvo e ascensionale del monumento. Per la terza volta nella storia, nel 2011 è stata prevista la ricostruzione dei tre padiglioni posti al primo livello della Torre Eiffel. L'intervento è stato eseguito per migliorare i servizi di accoglienza e per incoraggiare la sosta dei turisti. Il concorso organizzato dalla SETE, *Torre Eiffel Operating Company* è stato vinto da un partenariato guidato dall'agenzia *Moatti & Rivière architectes*, in collaborazione con BATEG².

In particolare, il progetto ha previsto la demolizione e la ricostruzione dei padiglioni *Eiffel* (lato Nord/Est) e *Ferrié* (lato Sud/Ovest), mentre il terzo padiglione ospitante il ristorante *58 Tour Eiffel* (lato Nord/Ovest), è stato stilisticamente conformato agli altri due.

La demolizione ed il trasporto in quota dei materiali hanno richiesto lo sviluppo di appositi sistemi di cantierabilità. Immersi tra i pilastri delle colonne di metallo, le tre nuove strutture dei padiglioni presentano una facciata a doppia curvatura realizzata interamente in vetro ed ancorata ad un involucro la cui pelle è stata tinteggiata in lamiera marrone e rossa in memoria dell'originario colore della Torre³. Tra i principali obiettivi, il progetto mira a migliorare il rendimento energetico del sistema: durante i mesi estivi la facciata ridurrà la dissipazione del calore proveniente dagli ambienti interni delle strutture di almeno il 25%⁴. Le immagini mostrano che il profilo delle scatole in lamiera rossa

dei padiglioni *Eiffel*, *Ferrié* e del padiglione 58 è visibilmente influenzato dalla geometria dei pilastri inclinati della Torre, la cui forza ascendente sembra attirare verso l'alto l'intero sistema (figg. 2-4). Grazie all'uso innovativo dei materiali, consentito dallo sviluppo di sofisticati programmi di calcolo, è stato possibile legare l'intero progetto al dinamismo della torre.

Tra le motivazioni che hanno favorito la scelta di questo caso studio emergono le avanzate ed innovative sperimentazioni di *Paneling* condotte dal gruppo *Evolute GmbH* in collaborazione con il gruppo RFR⁵. La forma della superficie a doppia curvatura della facciata è stata "schizzata" dall'architetto e successivamente ottimizzata per semplificarne la discretizzazione con elementi prefabbricati a singola curvatura. L'utilizzo di superfici rigate, in alcuni casi sviluppabili, ottimizza l'intero approccio dal punto di vista costruttivo, economico ed estetico rendendo possibile il molteplice uso di uno stesso stampo per la fabbricazione di numerosi pannelli in vetro aventi forma differente ma stessa curvatura.

La rete di curve estratta dalla superficie delinea e delimita il profilo e la dimensione di ciascuno dei pannelli. L'elevata qualità del risultato ottenuto per la razionalizzazione delle facciate è assicurata dalla computazione del raccordo globale tra i pannelli cilindrici che meglio approssimano le porzioni originali di superficie a doppia curvatura.

Grazie alle ricerche e all'utilizzo degli strumenti sviluppati da *Evolute GmbH*, gli *Evolute Tools*⁶, è possibile simulare l'analisi e la gestione delle condizioni e delle problematiche relative a questo specifico caso. L'ambizione dell'architetto era quella di realizzare un padiglione la cui facciata si curvasse fino a coincidere, in sommità, con la proiezione del profilo dell'affaccio del primo piano della Torre.

Il primo *step* prevede la verifica della validità delle



Figg. 4, 5/ Viste interna ed esterna della facciata del *Padiglione Eiffel* con andamento ascendente del padiglione *Eiffel*. (Foto dell'autore).

Fig. 6/ La facciata in vetro a doppia curvatura del *Padiglione Eiffel*. (Foto dell'autore).

5 Rfr.fr
6 Evolute.at

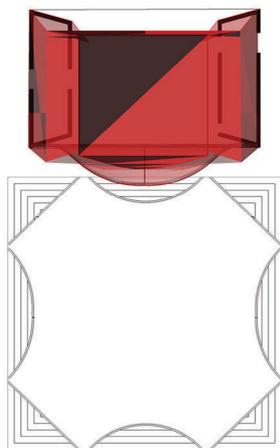


Fig. 7/ La forma della superficie segue il profilo curvo dell'affaccio centrale del primo livello della Torre. (Elaborazione dell'autore).

possibili soluzioni formali generate in risposta alla specifica volontà espressa dall'architetto (fig. 7).

L'analisi della curvatura gaussiana della superficie è finalizzata soprattutto alla ricerca di un *pattern* distributivo regolare delle linee di curvatura principale.

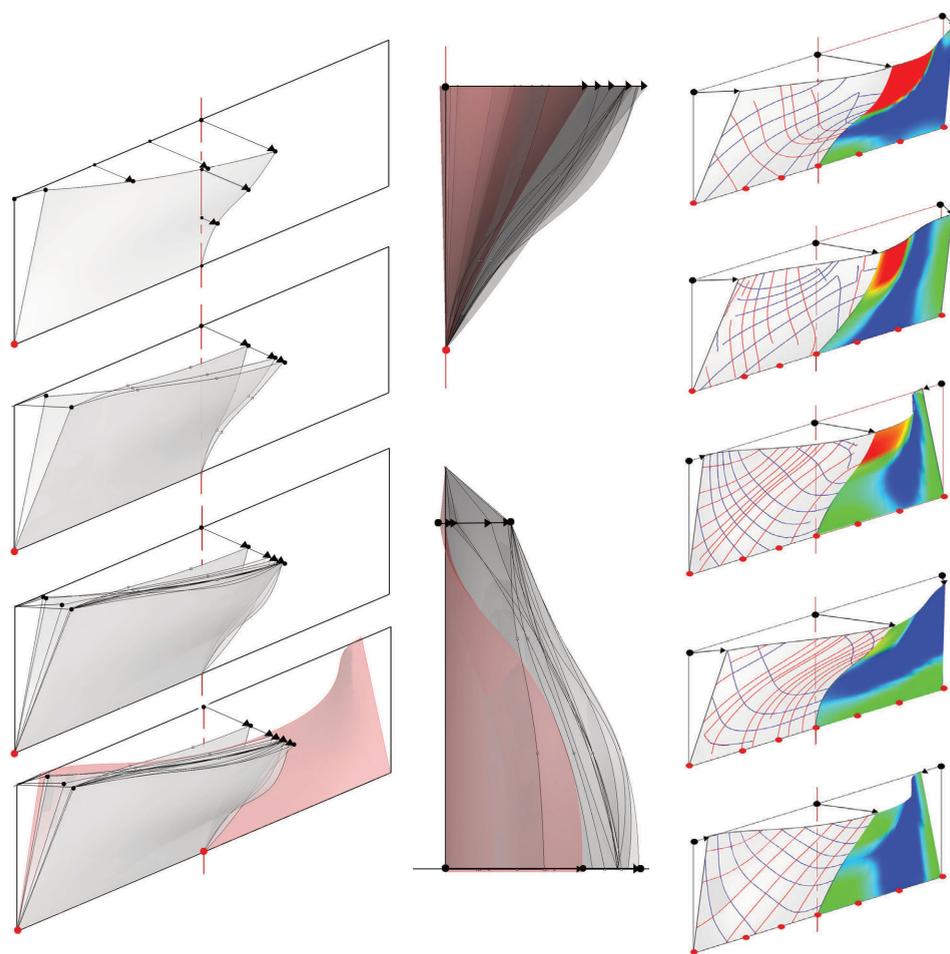
La rete di curve che caratterizza la soluzione ottimale è quindi composta da curve regolari ed è priva di punti di singolarità. Il *pattern* finale di suddivisione della facciata, quindi il numero e la dimensione dei pannelli ed il posizionamento del varco d'ingresso, è stato definito dai *geometry experts* in collaborazione con gli architetti⁷.

Le tre facciate degli *Eiffel Pavilions* rappresentano una sfida nel campo della realizzazione di pelli vetrate complesse. Alla figura dell'architetto e dell'ingegnere si uniscono le figure dei matematici e degli informatici, le cui competenze sono necessarie per trasformare le volontà progettuali in una soluzione traducibile in linguaggio macchina, ma soprattutto sostenibile. La collaborazione tra *RFR Paris* ed *Evolvute GmbH* è scaturita nello sviluppo di un'apposita soluzione di *Paneling* capace di approssimare nella migliore maniera possibile la curvatura e la continuità delle superfici limitando i costi di fabbricazione. Ancora una volta, la geometria rappresenta lo strumento ideale attraverso cui esplicitare il linguaggio implicito della matematica e dell'informatica. Tuttavia, l'astrazione geometrico-matematica dei processi rappresenta sempre una condizione ideale puntualmente ed inevitabilmente condizionata dalle leggi e dalle proprietà chimiche e fisiche dei materiali e dalle tecnologie di fabbricazione e montaggio necessarie per la realizzazione del progetto. L'approccio di pre-razionalizzazione è consistito quindi nel modellare la forma in maniera consapevole ricercando le specifiche condizioni geometriche per le quali il *pattern* distributivo di curve coniugate fosse il più possibile regolare⁸ (figg. 8, 9).

Alla luce delle conoscenze teoriche pregresse, lo

⁷ Shiftner 2012, p. 222.

⁸ *Ibidem*, p. 221.



strumento di analisi della curvatura gaussiana assume pertanto per l'architetto il ruolo di strumento progettuale. La rete delle linee di curvatura della superficie è visibile sulle facciate in quanto coincidente con le travi e i montanti che compongono la parte strutturale del sistema (fig. 10). Un approccio progettuale consapevole consente di veicolare la distribuzione delle reti di curve "nascoste" all'interno di una forma. Una buona rete di curve può produrre valori di divergenza molto bassi tra pannelli adiacenti aventi stessa curvatura ma diverso allineamento anche per superfici di partenza molto curve.

Fig. 8/ La ricerca della forma. (Elaborazione dell'autore, *Rhino + Grasshopper*).

Fig. 9/ Analisi della curvatura gaussiana delle soluzioni formali elaborate (*Rhino + Grasshopper: Analisi Curvatura; Evolute Tools Pro*: estrazione linee di curvatura. Elaborazione dell'autore).

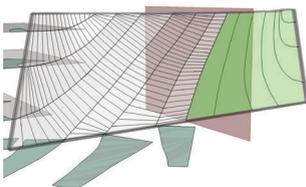
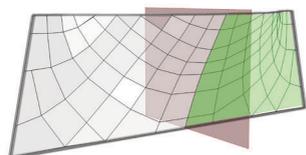
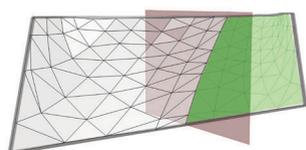
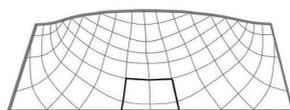
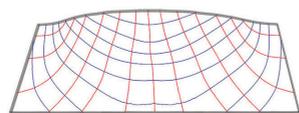


Fig.10/ Le linee di massima (in rosso) e di minima (in blu) curvatura definiscono il *pattern* del *paneling* ed il disegno della struttura. (Elaborazione dell'autore).

Fig.11/ Triangolazione della superficie (pannelli piani). (Elaborazione dell'autore).

Fig.12/ Computazione della *PQMesh* sulla base della rete delle linee di curvatura principale (pannelli piani). (Elaborazione dell'autore - Software: *Evolute Tolls Pro*).

Fig. 13/ Computazione della *DStrip*. (Elaborazione dell'autore - Software: *Evolute Tolls Pro*).

9 Cfr. Parte seconda.

10 Eigensatz 2011, p. 5.

11 Cfr. cap. VI.

12 Cfr. Parte seconda, p.177.

Una rete di curve regolare consente, in fase di discretizzazione, di assecondare il più possibile la curvatura e la forma della superficie originaria.

Per razionalizzare la superficie sono state sperimentate diverse soluzioni di *Paneling*. La soluzione più economica ed immediata per la realizzazione di una superficie *free form* prevede l'utilizzo di pannelli triangolari piani (fig.11). Per ricavare tale soluzione è possibile procedere speditamente tracciando le diagonali delle celle quadrangolari individuate dalla rete di curve. Tuttavia, il *pattern* quadrangolare permette la realizzazione di nodi strutturali privi di torsione ed è quindi preferibile a quello triangolare.⁹

Per discretizzare la superficie in elementi quadrangolari piani è stato necessario planarizzare le celle sghembe individuate dalla rete di linee di curvatura principale (comando *et_planarize* - *Evolute Tools Pro*) (fig.12). La *PQ Mesh* ricavata dalla perturbazione dei vertici della rete di curve coniugate favorisce la trasformazione delle *PQ Strips* in *DStrips*, cioè in strisce sviluppabili¹¹ (fig. 13, 15).

Lungo le linee di curvatura principale la torsione è nulla e l'inviluppo dei piani tangenti e delle normali di tali curve generano delle superfici sviluppabili e perpendicolari tra loro¹². La possibilità di ottimizzare una superficie complessa mediante la distribuzione di strisce sviluppabili aumenta notevolmente se la forma di base è prevalentemente a curvatura gaussiana negativa o nulla in quanto tale superficie segue spontaneamente l'andamento delle superfici a doppia curvatura rigate. Utilizzando il comando *et_subdivide/DStrip* (*Evolute Tools Pro*) è automaticamente possibile trasformare una *PQ Strip* in una *DStrip* (fig. 13). Tuttavia, nonostante la validità scientifica e la convenienza economica di tale soluzione non è attualmente possibile produrre delle strisce di vetro curvo di tali dimensioni. Confrontando le diverse soluzioni testate per discretizzare la su-

perficie è possibile notare che, nonostante la distribuzione dei tasselli segua la rete di curve coniugate, la superficie assume un aspetto sfaccettato generando la riflessione discontinua dell'ambiente circostante¹⁰. Tale condizione è verificabile anche attraverso lo strumento di analisi delle *curve zebra* estratte dalle diverse soluzioni di *Paneling* (fig. 14). Per tale ragione, le soluzioni che prevedono la distribuzione di pannelli piani sono state scartate in quanto non rispettano le volontà estetiche dell'architetto. Pertanto, come anticipato, la superficie è stata discretizzata attraverso la distribuzione di pannelli cilindrici. L'algoritmo *Panel Fitting* computa la trasformazione delle porzioni di superficie a doppia curvatura in porzioni cilindriche mediante l'allineamento delle direzioni asintotiche delle porzioni di superficie: le generatrici g_i tendono progressivamente a seguire l'andamento ascendente delle linee di massima curvatura (curve rosse), mentre le direttrici seguono le linee di minima curvatura (curve blu)¹³ (fig.16).

La qualità di un sistema discreto, semidiscreto o misto, è condizionata principalmente dalla presenza di lacune (*divergence*) e dalla variazione degli angoli di inclinazione (*kink angles*) tra gruppi di pannelli adiacenti. L'algoritmo *Panel fitting* (*Evolute Tools Pro*), la computa la soluzione finale ottimizzando tali parametri nel rispetto dei requisiti richiesti. Applicando in maniera ricorsiva tale algoritmo ed impostando i valori di tolleranza ritenuti ottimali al raggiungimento dello scopo è possibile raggiungere il livello di qualità desiderato. Il *Panel fitting* di una superficie può eseguito computando il *Local fitting* e il *Global Fitting*¹⁴ dei pannelli cilindrici. Mentre il *Local Fitting* dei cilindri ha determinato degli elevati valori di divergenza tra le strisce di pannelli¹⁵ l'algoritmo *Global fitting* (*advanced kink angle control*) consente di ottimizzare l'allineamento globale dei cilindri riducendo i valori di divergenza.

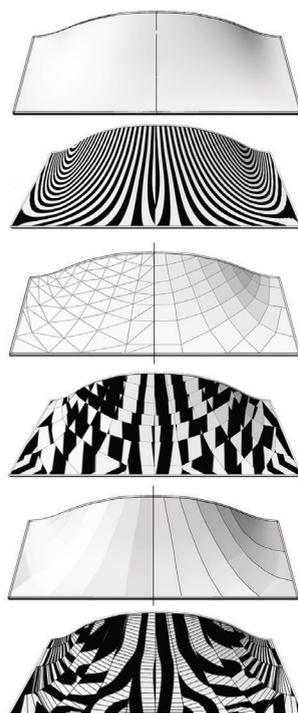


Fig.14/ Analisi Zebra (Rhino) dei sistemi discreti e semidiscreti ricavati. (Elaborazione grafica dell'autore, software utilizzati: *Evolute Tools Pro* e *Rhino*)

13 Eigensatz 2011, p. 5.

14 *Ibidem*, p. 6.

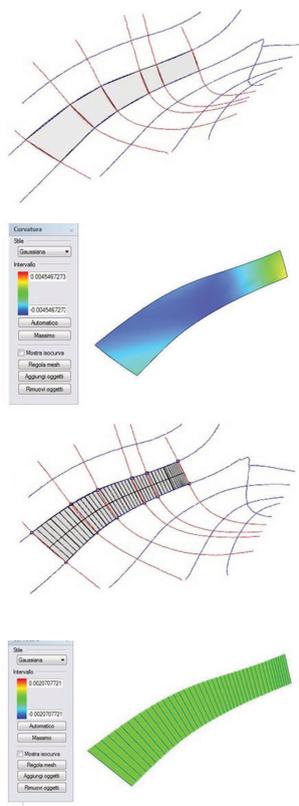


Fig. 15/ Confronto tra una striscia di superficie a doppia curvatura e la *DStrip* (modello semidiscreto) computata raffinando una *PQStrip* (*Rhino - Evolute Tools Pro*). L'analisi della curvatura mostra la variazione di curvatura della striscia in seguito alla trasformazione. (Elaborazione dell'autore).

Fig. 16/ A pagina seguente: Simulazione del processo di ricerca dei cilindri realizzata in relazione alla corrispondenza tra l'inclinazione delle generatrici e le linee di massima curvatura (in rosso). (Elaborazione dell'autore).

- 15 Eigensatz 2011.
- 16 Leduc 2012, p. 96.
- 17 *Ibidem* p. 99.
- 18 *Ibidem* p. 98.

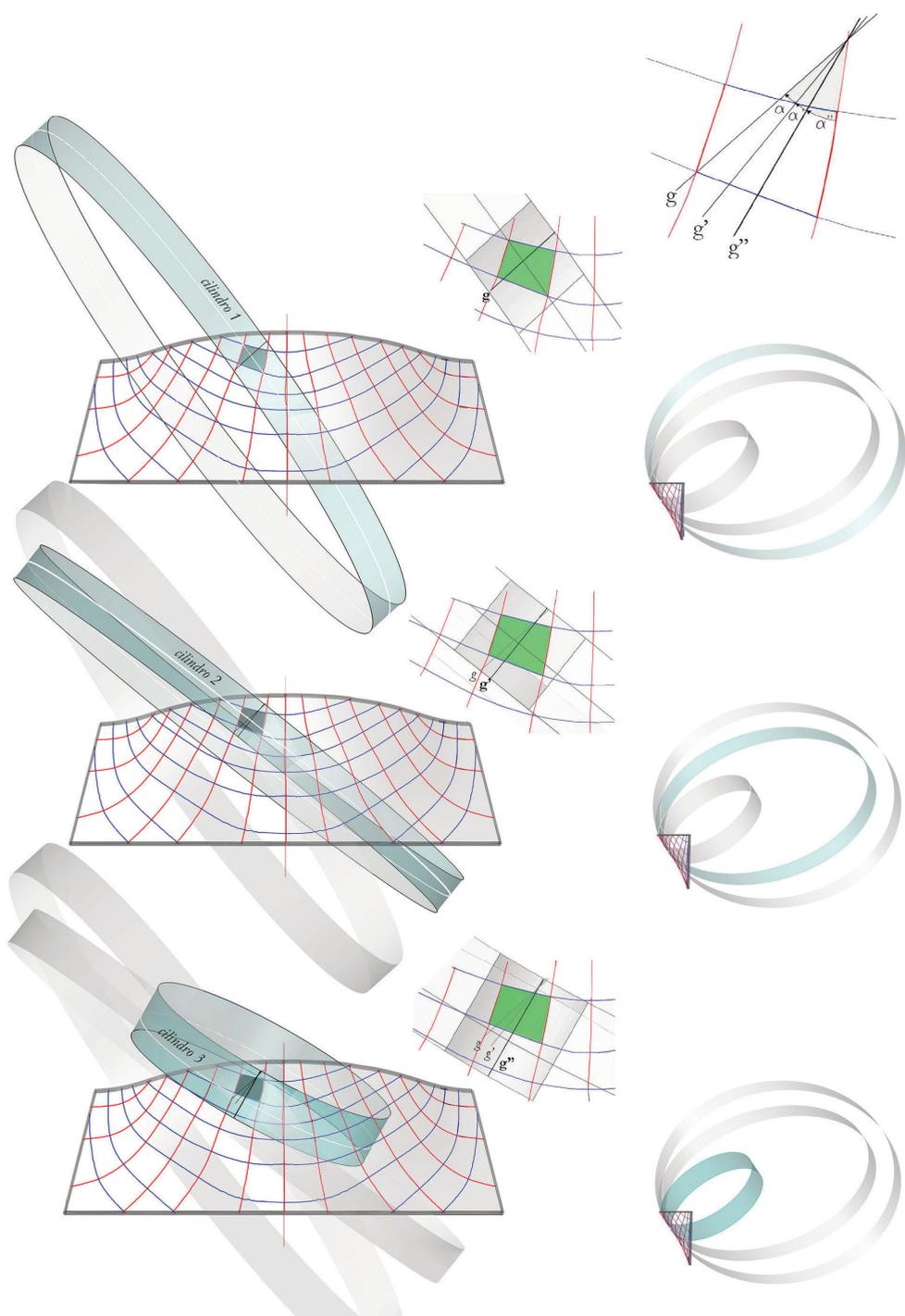
Il processo assicura il raggiungimento di un'elevata qualità estetica e tecnologica del prodotto finale, ottimizzando le prestazioni della facciata e minimizzando i costi di fabbricazione totali.

I *geometry experts* hanno inoltre sperimentato la *Panel Fitting* di altri tipi di superfici analitiche. Per le facciate è stata computata la distribuzione di porzioni di paraboloidi iperbolici e di toro, dunque superfici a doppia curvatura capaci di approssimare forme complesse con elevata precisione e migliorando quindi ulteriormente il *pattern* di riflessione della facciata¹⁶. La rete di linee di curvatura estratta dalla superficie è stata ulteriormente utilizzata per modellare le strisce metalliche che, assemblate, compongono i montanti curvi della sottostruttura del sistema.

Le normali alle linee di curvatura principale generano una superficie sviluppabile¹⁷. Tale proprietà è stata sfruttata per fabbricare le strisce di lamiera che saldate compongono le facce curve dei montanti della facciata. Le strisce che compongono le *beam box* (travi scatolari) possono, dunque, essere modellate utilizzando delle superfici *loft* le cui curve di sezione successive coincidono con le normali alle linee di curvatura principale: pertanto, tali strisce sono sviluppabili. Eseguendo l'*offset* delle strisce ottenute a destra e a sinistra della curva si ottengono le due facce laterali della *beam box* (figg. 17, 18). Per completare il profilo dell'elemento si procede con la costruzione delle facce frontale e posteriore mancanti, le quali saranno anch'esse, di conseguenza, delle superfici sviluppabili poiché costruite sui bordi delle strisce precedentemente ricavate.

I pannelli di vetro sono stati fabbricati utilizzando delle *glass bending and tempering machines* a controllo digitale¹⁸ capaci di garantire una buona qualità di tempratura del vetro, tolleranze di fabbricazione molto precise e costi ragionevoli. I pannelli sono composti da uno strato esterno di vetro laminato e

Sistema semidiscreto portato: le *Eiffel Tower pavilions façades*



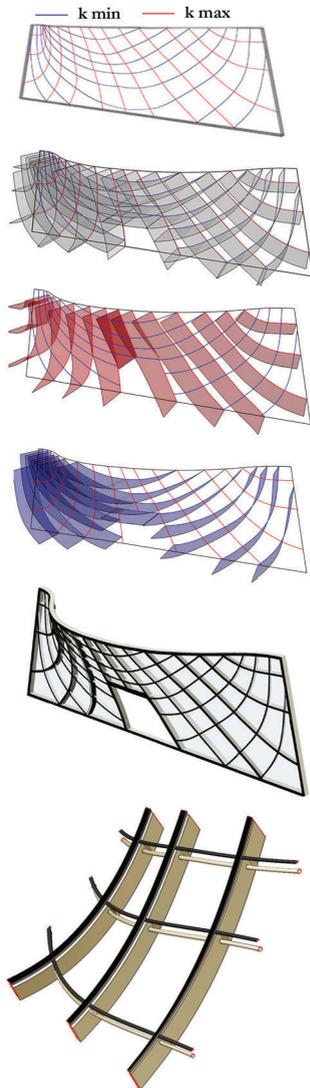


Fig. 17/ In colonna: le strisce sviluppabili costruite sulle normali alle linee di curvatura principale della superficie. (Rielaborazione dell'autore)

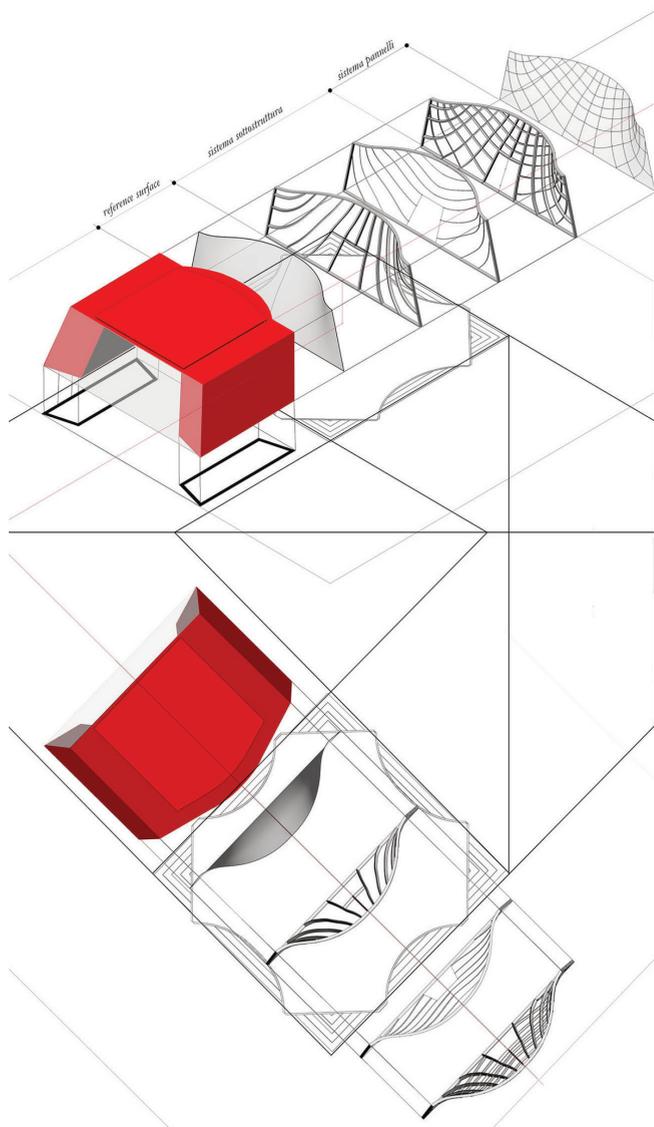


Fig. 18/ A destra: esploso del sistema di facciata composto dalla sottostruttura e dal sistema di pannelli in vetro e insieme delle superfici coinvolte per la progettazione della facciata.

temperato per garantire la sicurezza nei confronti dei visitatori e da uno strato interno di vetro temperato per garantire alla facciata delle buone prestazioni di carattere termico¹⁹. La lunghezza dei pannelli è definita come la lunghezza massima calcolata lungo la direzione delle generatrici dei cilindri.

Le strisce di lamiera che compongono i montanti della sottostruttura sono state fabbricate grazie all'uso di *laser cut flat metal sheets*²⁰. Tali strisce sono state successivamente saldate per chiudere il profilo dei montanti (figg. 19, 20). In sintesi, le facciate degli *Eiffel Pavilions* sono dunque composte da pannelli cilindrici portati da una sottostruttura in acciaio composta da strisce sviluppabili. Il sistema di montanti trasferisce i carichi sui bordi dell'involucro di lamiera rossa che, a loro volta, sono ancorati al solaio di calpestio del primo piano della Torre (fig. 21).

È doveroso sottolineare che, ad oggi, grazie allo sviluppo di componenti digitali *open source* che consentono la programmazione di definizioni che consentono l'inserimento di algoritmi genetici (*Galapagos, add-on* di *Grasshopper - Rhino*), è possibile computare la migliore soluzione per la razionalizzazione di una superficie complessa mediante la distribuzione ottimizzata di *set* di pannelli o strisce sviluppabili o pre-stabiliti. Tuttavia, in caso di utilizzo di pannelli in vetro, è possibile approcciare il problema soprattutto in termini di trasformazione geometrica di porzioni di superficie a doppia curvatura in porzioni di superfici rigate. Per fabbricare pannelli o strisce sviluppabili è necessario scegliere materiali adeguati e considerare le dimensioni consentite dalle macchine disponibili. Lo studio di questo caso è stato utile per lo sviluppo di riflessioni, ipotesi e sperimentazioni affrontate all'interno del capitolo successivo. Data la grande convenienza relativa all'utilizzo di pannelli piani o rigati è utile orientare il processo di ricerca della forma in funzione dell'utilizzo di tali tipi di superfici.



Figg. 19-21/ Particolari della sottostruttura della facciata. (Foto dell'autore)

¹⁹ *Ibidem* p. 97.
²⁰ Shiftner 2012, p. 224.



Fig. 24/ Viste di insieme e di dettaglio del *Padiglione Eiffel* e della cabina dell'ascensore, le cui facciate in vetro sono strisce sviluppabili. (Foto dell'autore).

