

# sintesi di tesi di laurea

Università degli Studi di Firenze - Facoltà di Ingegneria - Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Edile

## LE CUPOLE GEODETICHE PER GRANDI COPERTURE: PROGETTO DEL NUOVO MANDELA FORUM A FIRENZE

Autore: Giulia ARMENI

Relatori: Prof. Ing. Claudio BORRI, Prof. Ing. Paolo DE BARTOLOMEIS, Ing. Vincenzo DI NASO, Prof. Ing. Maurizio ORLANDO

Data di Laurea: 7 luglio 2009

*L'idea delle strutture a guscio adagiate su geoidi (cupole geodetiche) non sembra conoscere ancora il suo tramonto.*

*Dopo circa 60 anni dal suo primo impiego, la cupola reticolare attrae, affascina e convince ancora le giovani generazioni di ingegneri che vi vedono sempre una felicissima soluzione al problema dialettico forma-struttura.*

*La tesi di Giulia Armeni mostra una volta di più come questa tipologia strutturale per grandi coperture si presti ottimamente anche e soprattutto nel caso di una struttura esistente: il suo grado di adattabilità e la facilità del suo inserimento in geometria in pianta di qualsiasi forma, sono forse tra le ragioni principali di questa eterna giovinezza delle cupole geodetiche.*

Prof. Ing. Claudio BORRI

### INTRODUZIONE

La proposta progettuale elaborata nella tesi riguarda la riqualificazione del Nelson Mandela Forum di Firenze, che è il più importante palazzetto dello sport della città.

Il palasport si trova in viale Paoli, al centro del parco urbano di Campo di Marte, vicino alla stazione ferroviaria e allo stadio Artemio Franchi di Pierluigi Nervi. L'assetto urbanistico fa di questa l'area più importante della città per le attività sportive. [Figura 1]

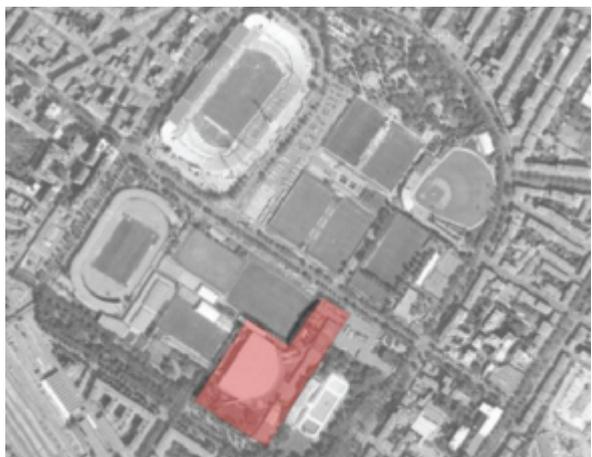


Figura 1 - Foto aerea del parco urbano di Campo di Marte, che ospita il Nelson Mandela Forum

L'attuale impianto del Mandela Forum è polivalente, ospita manifestazioni sportive, concerti, congressi, ed ha una capienza massima di 7000 spettatori circa.

Il palazzetto ha una pianta di forma irregolare di circa 100x75 m nel punto più ampio, raggiunge un'altezza di 18 m e attualmente la copertura è

piana e realizzata con travi reticolari. L'entrata principale è situata sul lato sud-est ed è collocata a 4 m di altezza rispetto al piano stradale, infatti l'accesso è garantito tramite una passerella pedonale. [Figura 2]

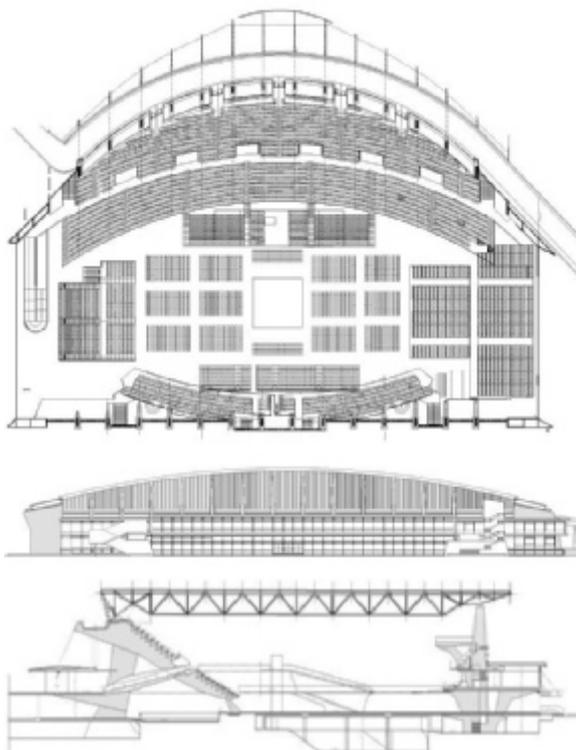


Figura 2 - Pianta piano terra, prospetto nord-ovest e sezione trasversale dello stato attuale del Mandela Forum

### PROGETTO DEL NUOVO NELSON MANDELA FORUM

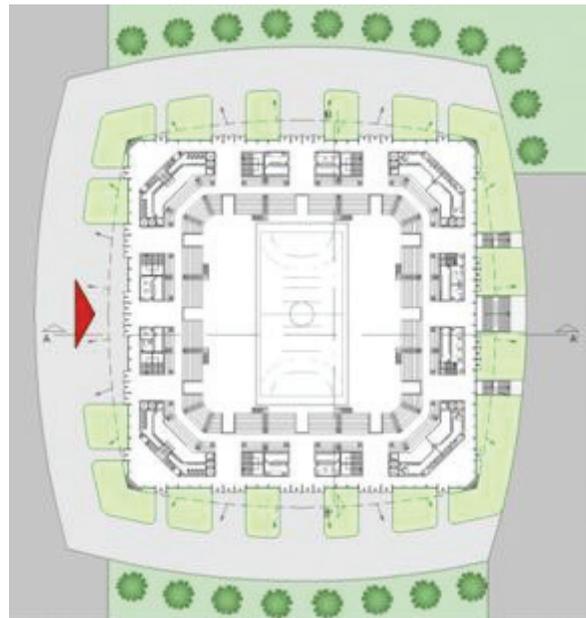
L'elemento che contraddistingue e connota il progetto del nuovo Nelson Mandela Forum è la cupola

geodetica in alluminio, nata dall'intento di realizzare una copertura per il palazzetto che avesse una forma e una struttura ottimali e funzionali.

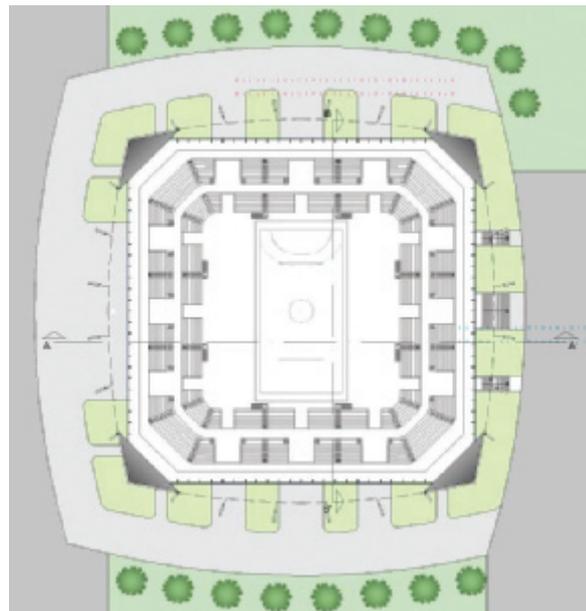
Il nuovo palasport è a pianta quadrata di lato 80m e l'orientamento è rimasto inalterato rispetto all'attuale palazzetto, con l'entrata principale a sud est [in rosso, figura 3a] e un'entrata sul retro da viale Malta.

Il palasport raggiunge un'altezza di 20 m, limite imposto dal Regolamento Edilizio, e si dispone su due piani. La struttura è polivalente ed ha una capienza di 8000 spettatori, maggiore di circa 1000 unità rispetto all'attuale.

Di fatto la progettazione in generale ha perseguito l'obiettivo di realizzare un palasport che accogliesse tutte le funzioni già presenti nell'attuale palazzetto e che potesse ospitare il numero più grande possibile di spettatori. Perciò si sono ottimizzate la forma e le dimensioni delle tribune [figura 3b], tenendo conto dei vincoli normativi per quanto riguarda le vie di esodo in caso di emergenza, e delle dimensioni regolamentari dei campi per le principali attività sportive e controllando che da ogni punto delle tribune ci fosse buona visibilità [1].



a)



b)

Figura 3 - Pianta piano terra (a) e pianta delle tribune (b), stato modificato



Figura 4 - Vista aerea dello spaccato del nuovo Mandela Forum

## LA CUPOLA GEODETICA DI COPERTURA

La copertura è l'elemento che contraddistingue il progetto.

La scelta della cupola è nata dalla considerazione che questo tipo di copertura non solo si presta a coprire grandi luci ma è anche particolarmente adatta a coprire grandi spazi come quelli di un palasport. Infatti è ben noto, come caso particolare di più generali disuguaglianze isoperimetriche, che la superficie sferica è quella che racchiude il maggior volume possibile a parità di area.

Una volta scelta la forma della cupola si sono passate in rassegna le tipologie di cupole metalliche a traliccio [2], avendo escluso la possibilità di un guscio in cemento armato. L'intento infatti era quello di realizzare una struttura metallica leggera, di rapida costruzione e facile montaggio. Tra i vari reticoli di travi possibili il migliore è sembrato quello di tipo geodetico.

Ricordiamo che:

Una triangolazione geodetica della superficie sferica  $S^2$  è una triangolazione di  $S^2$  in triangoli geodetici, ovvero in triangoli i cui lati siano (segmenti di) geodetiche, ovvero linee di minimo percorso nella geometria Riemanniana di  $S^2$ , cioè archi di cerchi massimi;

Una cupola geodetica è una struttura iscritta in una porzione di superficie sferica e composta da una rete di travi i cui vertici coincidono con i vertici di una triangolazione geodetica.

Di particolare interesse per la loro semplicità e, quindi, per le loro proprietà di simmetria, appaiono le triangolazioni geodetiche (che chiameremo di Fuller) con vertici in cui concorrono 5 o 6 spigoli: esse sono in corrispondenza biunivoca con i cosiddetti Fulleroni, ovvero i poliedri convessi le cui facce siano pentagoni o esagoni. Il calcolo della caratteristica di Euler-Poincaré della sfera ci consegna immediatamente, per una triangolazione di Fuller, le seguenti relazioni (con ovvie notazioni):

$$\begin{cases} v_5 = 12 \\ v_6 = \frac{1}{2}(F - 20) \end{cases}$$

Pertanto una triangolazione geodetica di Fuller è caratterizzata dalle modalità di passaggio sulla triangolazione (parametri di Coxeter  $b, c$ ) tra due vertici adiacenti dell'icosaedro di base.

Nella tesi sono stati adoperati modelli matematici e computazionali che hanno confermato come questo reticolo di aste fosse il più vantaggioso.

Il grande vantaggio di un graticcio geodetico di aste è rappresentato dunque dal fatto che viene ottimizzata la lunghezza delle aste, rendendo minima la sommatoria delle lunghezze totale. Inoltre, data la regolarità del reticolo, conseguono sollecitazioni sostanzialmente uniformi nelle aste della struttura.

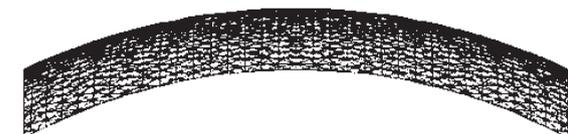
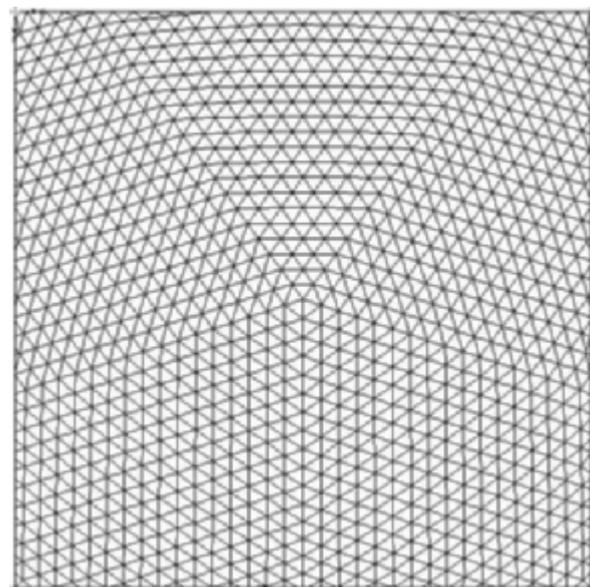
Dati i vincoli sull'ingombro in pianta e in altezza, per generare la cupola si è adottata una sfera di raggio 90 m tassellata con parametri  $[3,5]_{(38,0)}$  nella notazione di Schaffli-Coxeter e sezionata con opportuni piani.

Quanto finora detto mette in luce il ruolo fondamentale della Matematica in questo tipo di progettazioni: siamo infatti di fronte a forme geometriche pure di cui si utilizzano in modo diretto ed essenziale le proprietà caratterizzanti.

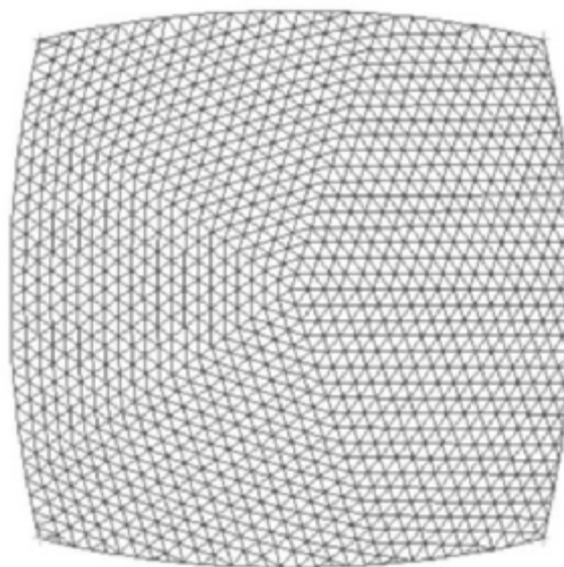
### ANALISI COMPUTAZIONALE DEL MODELLO STRUTTURALE

I piani di sezione inizialmente sono stati ipotizzati verticali ed è stato confrontato il comportamento del reticolo di tipo geodetico [Figura 5a] con uno di tipo grigliato a rete a maglia triangolare. I risultati hanno dimostrato che la seconda struttura ha deformazioni in media del 6% maggiori della prima. Dunque la prima configurazione con traliccio geodetico ha dimostrato un comportamento più rigido, come ci si aspettava.

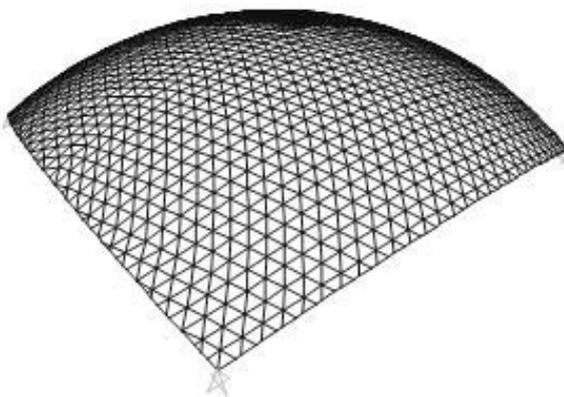
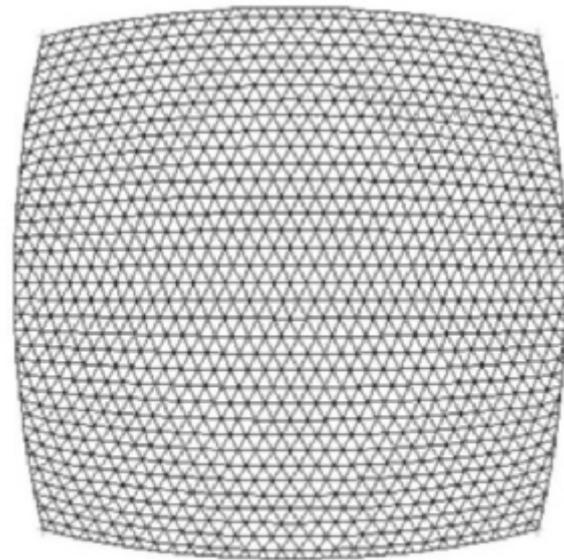
Successivamente per ragioni architettoniche si è deciso di tagliare la cupola con piani di sezione inclinati in direzione del raggio della sfera. Inoltre dato che il reticolo geodetico iniziale con pentagono in posizione centrale e simmetria polare [Figura 5b] mostrava un difforme andamento delle sollecitazioni, è stato costruito un terzo modello con reticolo geodetico doppiamente simmetrico tenendo conto della simmetria icosaedrica [Figura 5c].



a)  
20



b)



c)

Figura 5 - Pianta e prospetto dei principali modelli di copertura analizzati, assonometria del modello definitivo (c)

Il comportamento di questo terzo modello della copertura dimostra i vantaggi del graticcio geodetico di aste, che rispetto agli altri si rivela più rigido e consente altresì di minimizzare il materiale impiegato per le aste che compongono la struttura. Infatti la densità di aste in reticoli geodetici diminuisce allontanandosi dai pentagoni e dunque quest'ultima si è rivelata come la configurazione ottimale tra quelle possibili.

Sono stati applicati i carichi prescritti dalla normativa di vento, neve, peso proprio della copertura e dell'impianto di illuminazione e si è calcolato il momento di inerzia che la trave di bordo avrebbe dovuto avere per ottenere delle deformazioni della struttura accettabili. Si sono così ricavati dei valori propri di una trave a doppio T alta 170 cm e larga 80 cm. Perciò per ragioni architettoniche si è preferito infine adottare una trave di bordo più piccola, tubolare in acciaio di 40 cm di diametro, e inserire dei pilastri, anch'essi tubulari in acciaio, per garantire un buon comportamento deformativo della struttura. I risultati dell'analisi hanno mostrato un abbassamento massimo di 7,7 cm nel punto centrale e di 5 cm ai bordi nelle condizioni di carico più sfavorevoli. È stata inoltre svolta un'analisi di tipo buckling per mettersi al riparo dai fenomeni di instabilità globale, mentre l'instabilità locale è stata verificata come indicato dalla normativa vigente.

#### PROGETTO STRUTTURALE DEGLI ELEMENTI IN ACCIAIO E ALLUMINIO

Le verifiche degli elementi strutturali hanno accompagnato l'elaborazione del modello computazionale e hanno seguito le prescrizioni normative. Sono state effettuate verifiche di resistenza, deformazione, stabilità sulle aste di bordo e i pilastri in acciaio S275. L'unione tra questi ultimi due elementi è stata progettata con dei perni in acciaio di 5 cm di diametro.

Per quanto riguarda le travi che compongono la copertura sono state adottate travi a doppio T in alluminio di classe 6061-T6, che sono collegate alle travi di bordo per mezzo di unioni flangiate.

Data la mancanza di una legislazione nazionale riguardo la progettazione strutturale di elementi in alluminio [5], le travi sono state verificate secondo le prescrizioni dell'Eurocodice 9. Questa carenza è un chiaro segnale del fatto che l'impiego di questo materiale in campo strutturale nel nostro paese sia assai limitato, benché mostri molti vantaggi, come è stato illustrato nella tesi.

#### SISTEMA COSTRUTTIVO

Le travi interne sono di tre ordini: esse si differenziano per lo spessore di ali e anima pur avendo dimensioni esterne uguali (304,8x177,8 mm). Questa scelta è stata adottata allo scopo di ottimizzare il materiale impiegato, visto che erano presenti aste con valori di sollecitazione molto diversi, benché nei nodi fosse necessario avere aste afferenti di uguale altezza [Figura 6].

Questo sistema costruttivo è stato ideato dopo una fase di ricerca sulle soluzioni tecnologiche che il mercato offre per questo tipo di strutture. Le caratteristiche che deve avere un sistema co-

struttivo del genere sono: lunghezza delle aste variabile, angoli tra le aste di un nodo sul piano tangente variabili e angoli sul piano normale costanti, nodi rigidi, semplice e rapido montaggio.

Il sistema adottato prende spunto dal sistema Alumadome della Conservatek®. Le aste sono collegate tramite giunzioni bullonate sulle ali dei profilati a piastre in alluminio circolari che costituiscono i nodi.

Il tamponamento è costituito da pannelli di alluminio (poi opportunamente coibentati) o di polycarbonato alveolare, che sono collegati lungo tutto il perimetro ai membri strutturali con carter inseriti in un giunto interbloccante. Il sistema è realizzato grazie alla possibilità di creare travi estruse in alluminio con la predisposizione per l'alloggiamento dei pannelli di tamponatura.

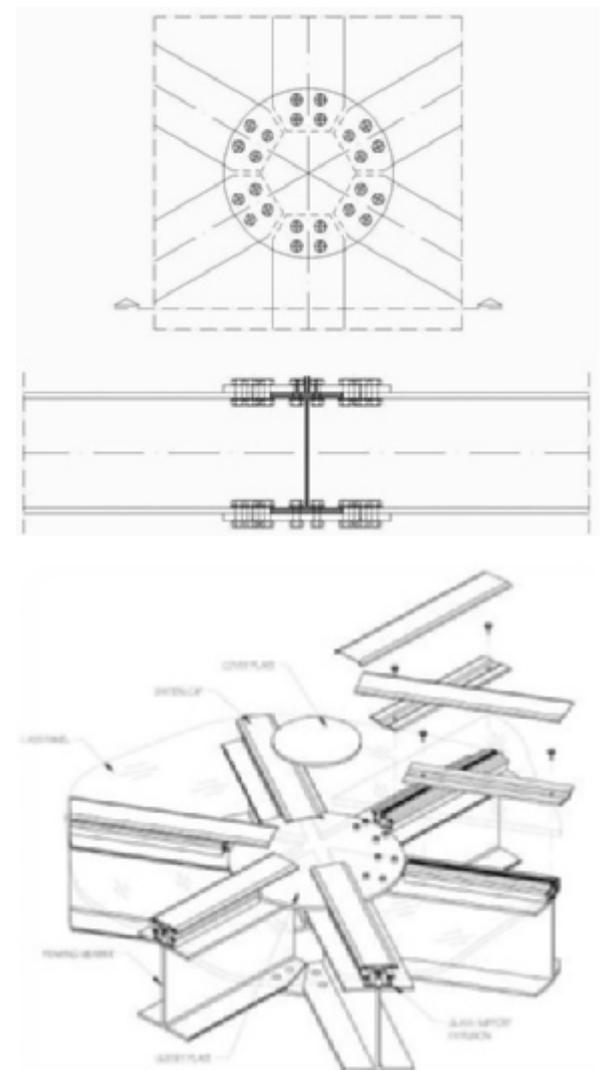


Figura 6 - Pianta, sezione e assonometria del nodo-tipo della copertura

#### PROGETTO ARCHITETTONICO

Oltre al sistema tecnologico per la copertura è stato poi studiato anche il sistema per le chiusure verticali. La loro importanza è data dal fatto che in questo progetto la pelle dell'edificio rappresenta una sorta di biglietto da visita dell'edificio stesso,

infatti la facciata e la copertura sono gli elementi che connotano e contraddistinguono il progetto.

La facciata è costituita da una parete vetrata verticale realizzata tramite un sistema a telai strutturale a effetto tutto vetro [Figura 7,8].

Il modulo in facciata è di 4,4 x 2,6 m ed è suddiviso in due parti da un traverso per ragioni statiche. Il controvento è stato progettato e verificato secondo l'Eurocodice 9 ed è costituito da montanti tubulari

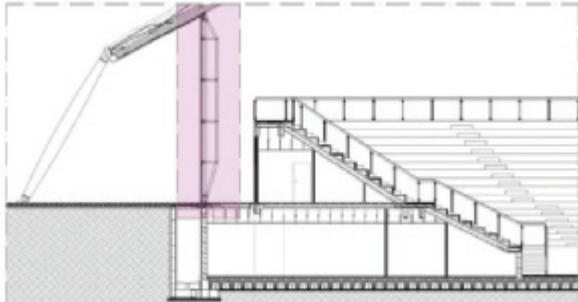


Figura 7 - Sezione trasversale del Mandela Forum, stato modificato

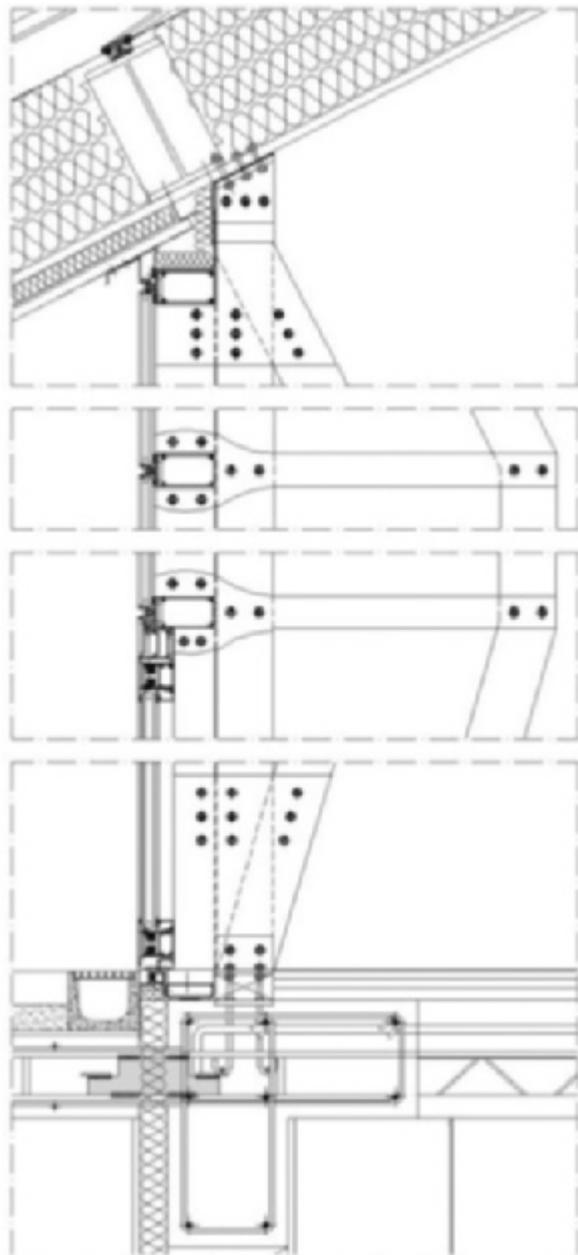


Figura 8 - Dettaglio della sezione di Figura 6, sistema tecnologico della facciata

rettangolari e traversi piatti in alluminio. Anche in questo caso tutte le unioni sono di tipo bullonato, visto che le saldature su profili in alluminio sono sconsigliabili perché diminuiscono sensibilmente le prestazioni e la resistenza del profilo stesso. I vincoli di appoggio in sommità, e di cerniera a terra, sono stati realizzati con piastre a L in acciaio.

Nel progetto dei particolari costruttivi della facciata è stata posta altresì attenzione alla prevenzione della formazione di ponti termici. Per questo sono stati inseriti elementi per il taglio termico del cemento armato nel nodo a terra con la trave di bordo, e la parte esterna dell'intradosso della copertura è stata coibentata e rivestita con un sistema di doghe in acciaio zincato.

#### BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- [1] A.GOTTFRIED, *Quaderni del manuale di progettazione edilizia: Tipologie - L'edilizia per lo sport e lo spettacolo*, ed.Hoepli
- [2] P.MATILDI, C.FOTI, A.SOLLAZZO, *Tensostrutture e sistemi reticolari spaziali*, ed.Italsider
- [3] M.CARMO, *Differential Geometry of curves and surfaces*, ed.Prentice-Hall
- [4] M.CORNALBA, *Note di geometria differenziale*, ed.Springer
- [5] F.M.MAZZOLANI, *Aluminum Structural Design*, ed. Springer

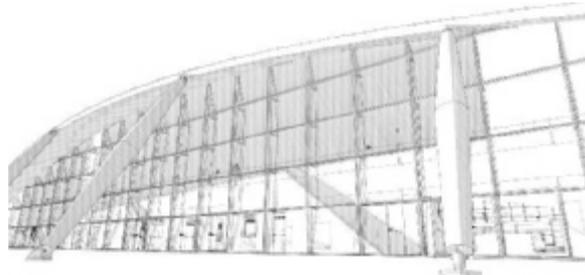


Figura 9 - Vista del prospetto del nuovo Mandela Forum



Figura 10 - Vista prospettica del nuovo Mandela Forum



Figura 11 - Vista prospettica dell'entrata principale del nuovo Mandela Forum



Figura 12 - Vista aerea del modello del nuovo palasport