

# Struktur Cangkang (*Shell Structure*)

M. Agung Wahyudi, ST.MT.

Prodi Arsitektur Fakultas Teknik & Informatika  
Universitas PGRI Semarang



# pengertian

- SHELL adalah struktur tipis natural, melengkung seperti cangkang telur, kerang, kura-kura, dan tengkorak manusia, berupa plat lengkung yang terbuat dari beton bertulang.
- Cangkang dibentuk untuk menyalurkan gaya yang dihasilkan tegangan membran, gaya tekan, gaya tarik dan gaya geser pada bidang permukaannya.
- Karena ketipisannya, struktur shell memiliki ketahanan tekuk yang rendah, serta tidak cocok untuk beban terpusat.

# fungsi

Struktur *shell* digunakan untuk efisiensi struktur yang tinggi, seperti bentang yang sangat panjang atau karena kebutuhan berat struktur yang sangat ringan.

# syarat

- berbentuk lengkung, tunggal, maupun ganda (*single or double curved*)
- tipis permukaan atau bentangannya
- dibuat dari bahan yang keras, kuat, ulet dan tahan terhadap tarikan dan tekanan.

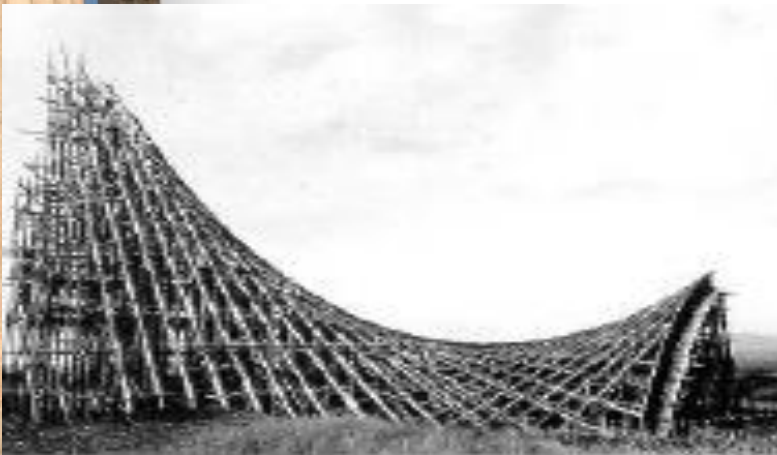
# material

Material yang paling cocok adalah **beton**, karena ketika dicampur dengan air dapat membentuk berbagai macam bentuk yang berpusat di dalam bekisting. Bagian kecil tulangan bisa ditekuk untuk mengikuti kelengkungan *shell*.



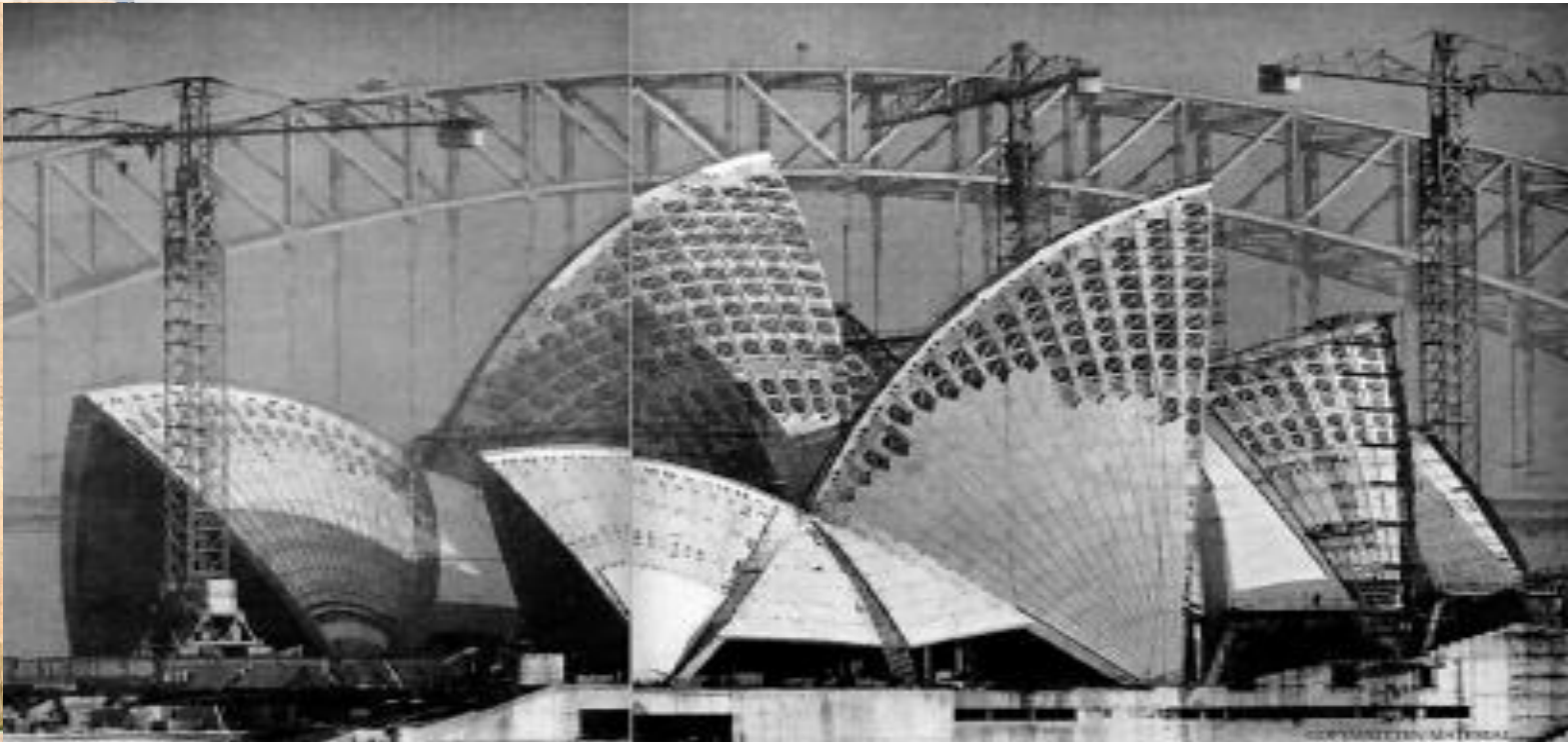
# Kelebihan *shell*

1. Konstruksi sangat ringan. Untuk bentang 30 meter dibutuhkan ketebalan sekitar 60 mm;
2. Beban mati dapat mengurangi beban pondasi dan sistem penopangnya;
3. Bentuk yang melengkung dapat terentang lebih panjang;
4. Secara estetika, *Shell* terlihat lebih bagus dibandingkan dengan bentuk konstruksi lainnya

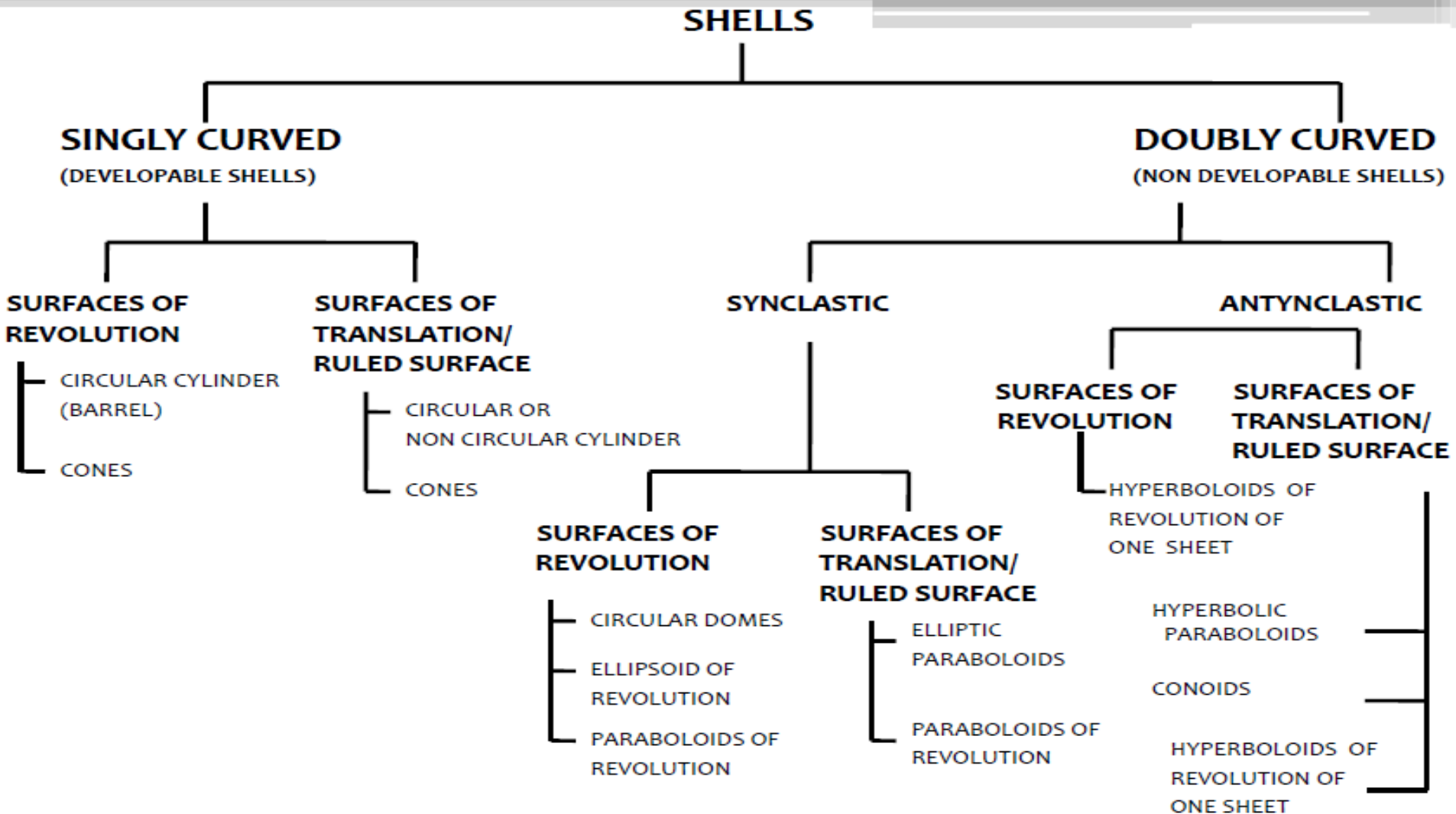


# Kelemahan *shell*

1. Masalah *Shuttering*
2. Diperlukan akurasi yang lebih besar pada bekisting
3. Diperlukan tenaga kerja dan pengawasan yang baik

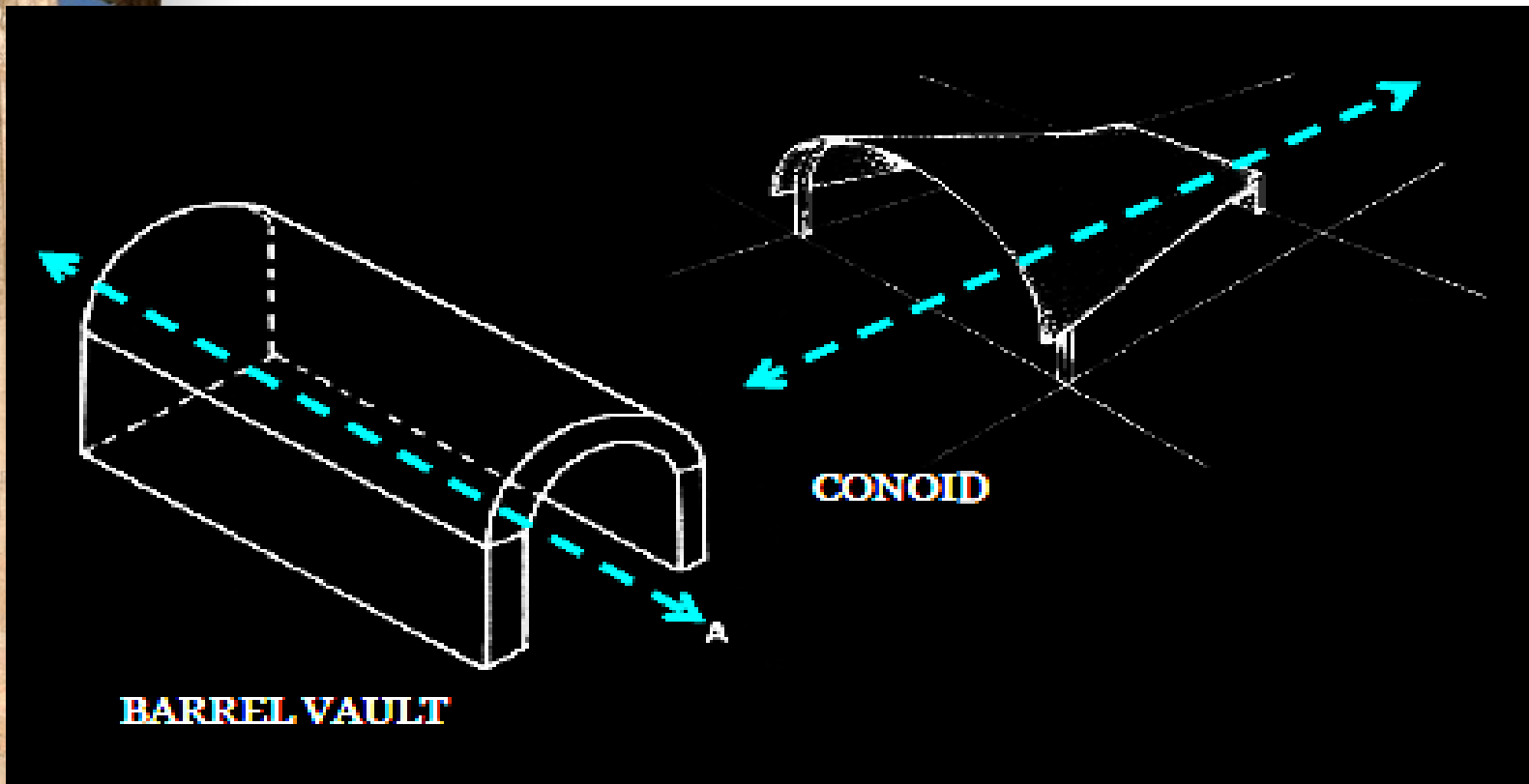


# Klasifikasi shell



# *single curved shell*

Arah lengkungannya dalam satu arah, serta permukaannya tidak diputar/digeser, dan dibentuk oleh konus yang sama.



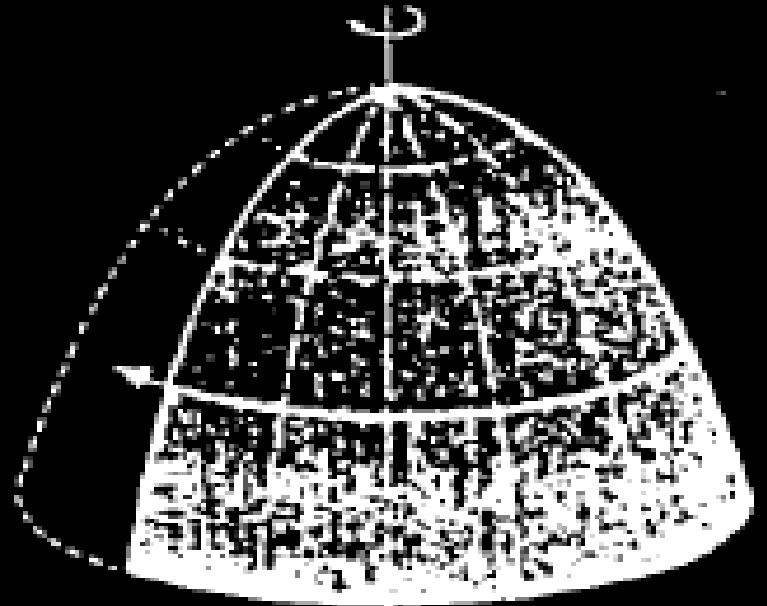
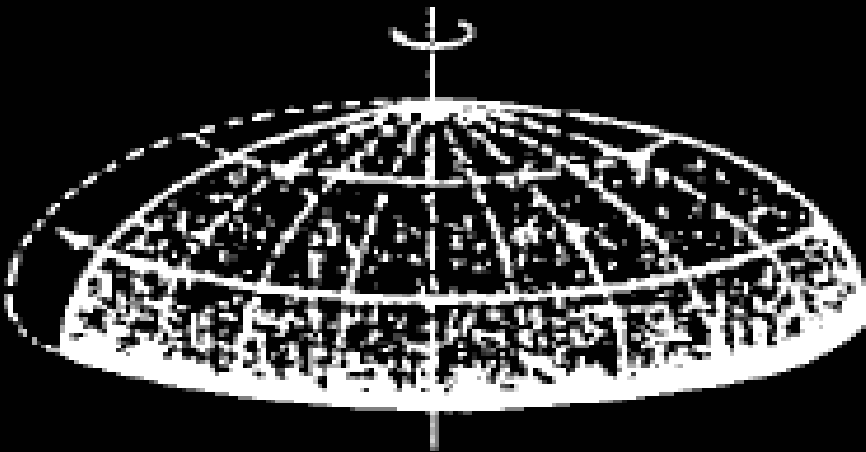


*single curved shell*

# ***Jenis-jenis single curved shell***

## ***1. Surfaces of revolution***

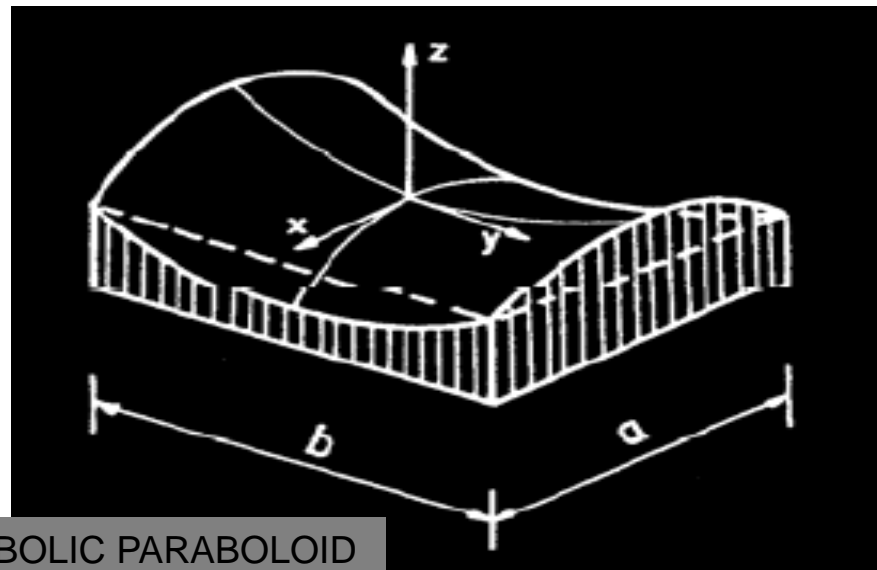
dibentuk dari putaran lengkungan bidang yang disebut lengkungan meredional, pada sebuah garis sumbu yang disebut putaran sumbu.



# *Jenis-jenis single curved shell*

## *2. Surfaces of translation (perubahan permukaan)*

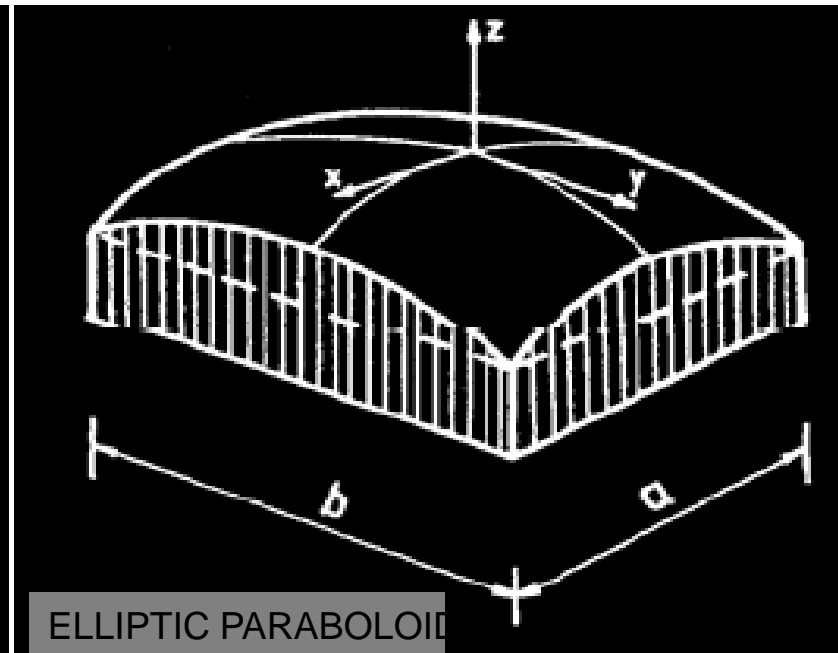
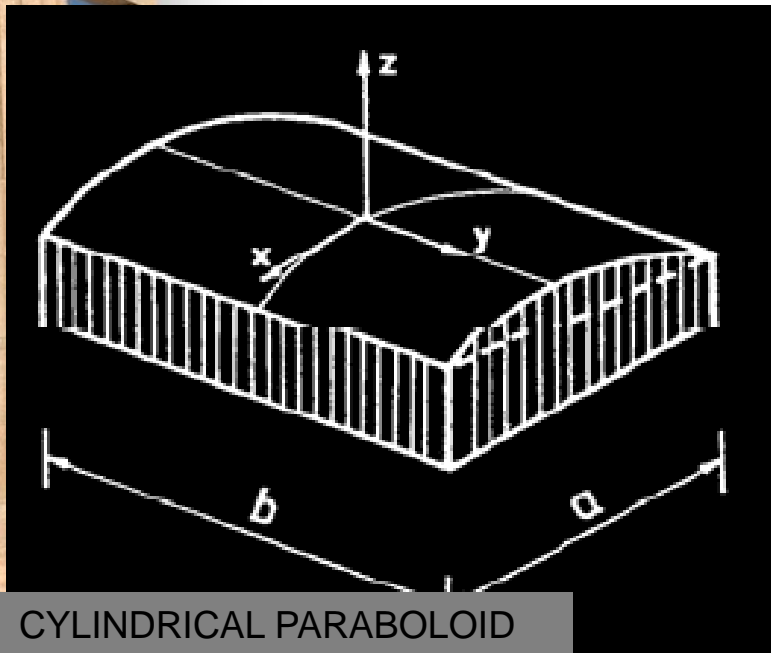
Dibentuk dengan menggeser lengkungan bidang sepanjang lengkungan bidang yang lain, sambil mempertahankan orientasi pergeseran lengkungan tetap konstan.



HYPERBOLIC PARABOLOID

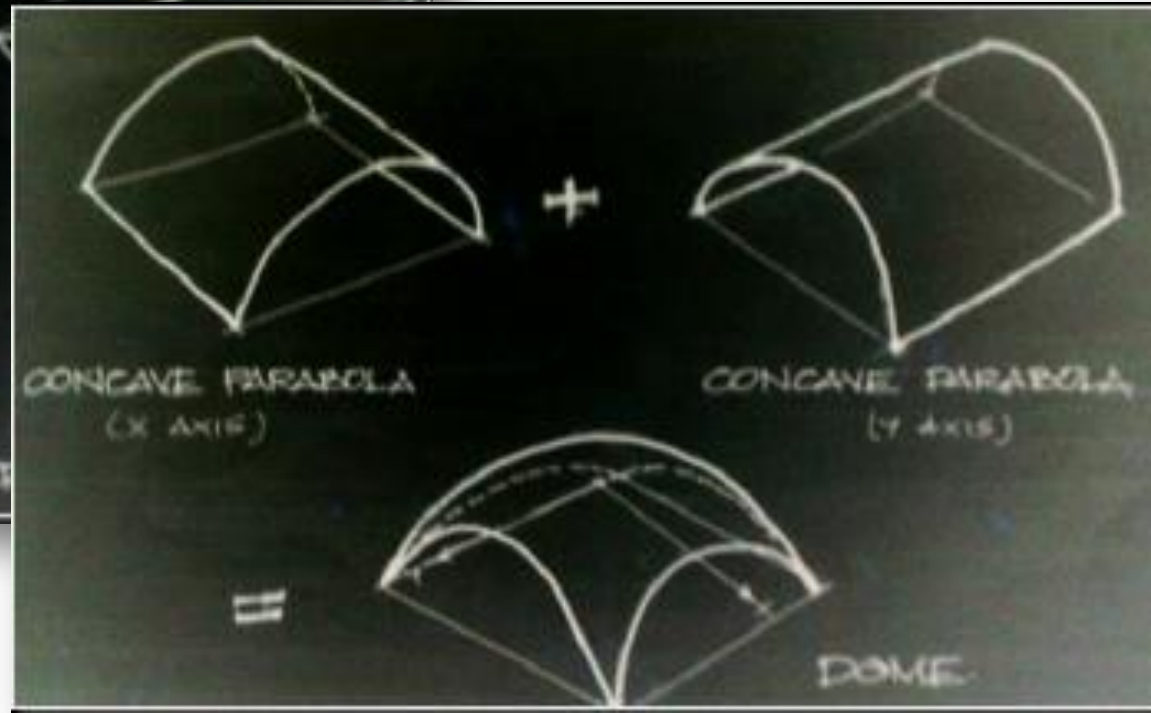
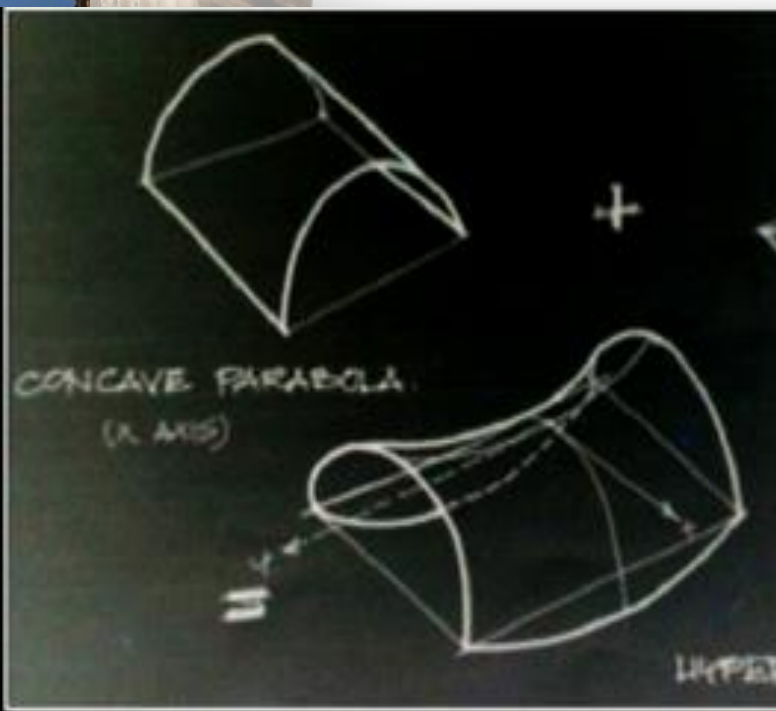
# *Surface of translation*

Lengkungan terakhir yang berasal dari lengkungan awal disebut generator permukaan.  
Jika generator merupakan garis lurus, permukaannya tersebut silindris.



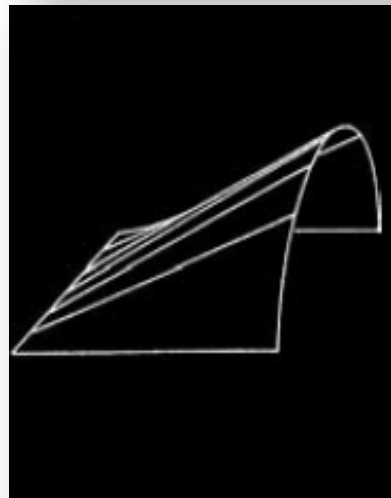
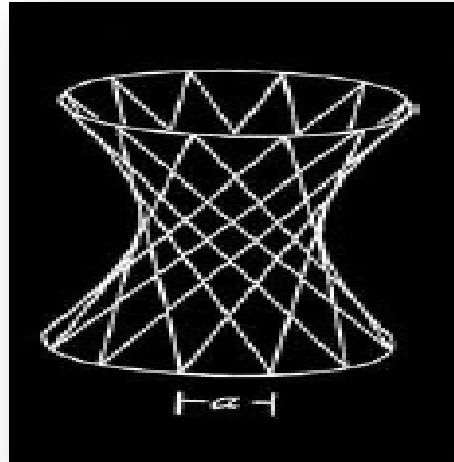
# Surface of translation

Jika dua parabola memiliki bentuk yang serupa, maka permukannya menjadi sebuah permukaan yang berevolusi, disebut *Paraboloid of Revolution*.



## 4. Ruled Surface

- *Ruled surface* dihasilkan dari pergeseran / pelengkungan setiap akhir garis lurus pada lengkungan atasnya.
- Garis garis ini tidak selalu pada sudut yang tepat untuk permukaan yang memiliki lengkungan pada ujungnya.



## 4. Barrel Surface

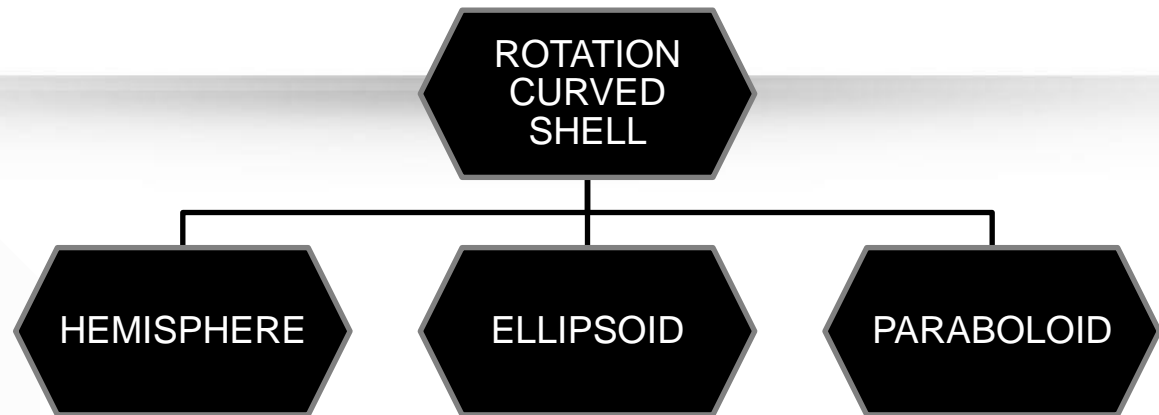
- Dibentuk dengan cara membengkokkan sebuah bidang datar hanya ke satu arah.
- *Barrel* terbentuk dari gabungan *arch action* dan *beam action*.
- Ada dua jenis utama barrel :
  - *Long Barrels*, arch action yang menonjol
  - *Short Barrels*, beam action yang menonjol





# ***Double curved shell***

# 1. Rotational Shell System

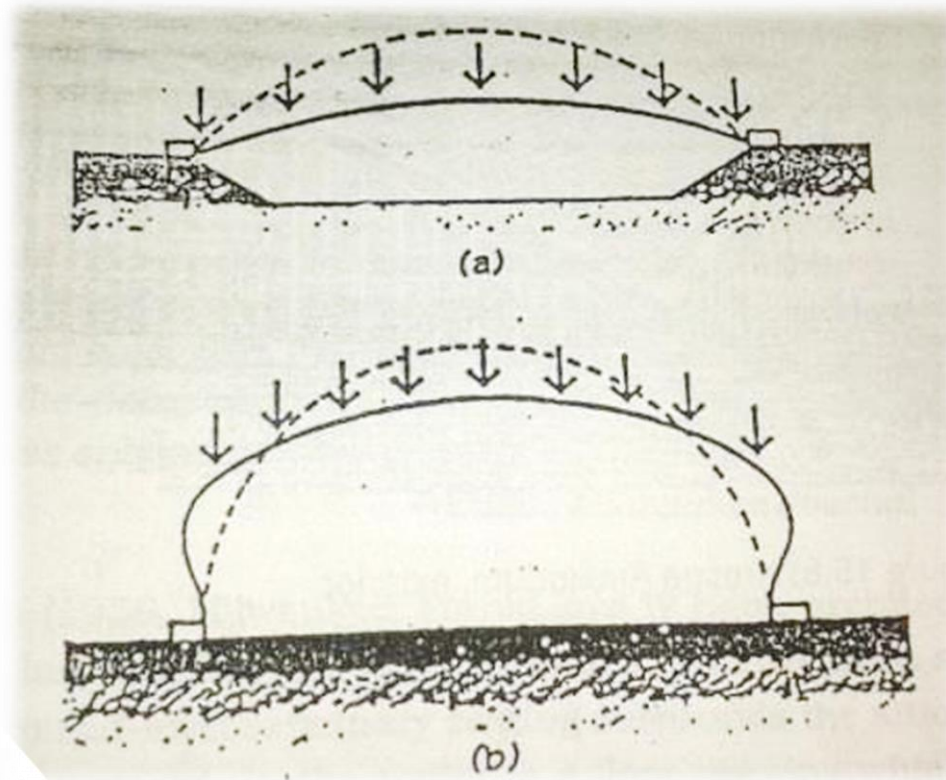


*Dome* merupakan revolusi permukaan yang dibuat melengkung sesuai garis sumbu.

Potongan vertikal pada *rotational shell* disebut **garis meridian/ longitudinal** dan potongan horizontal disebut ***hoop*** atau paralel.

## *a. hemisphere*

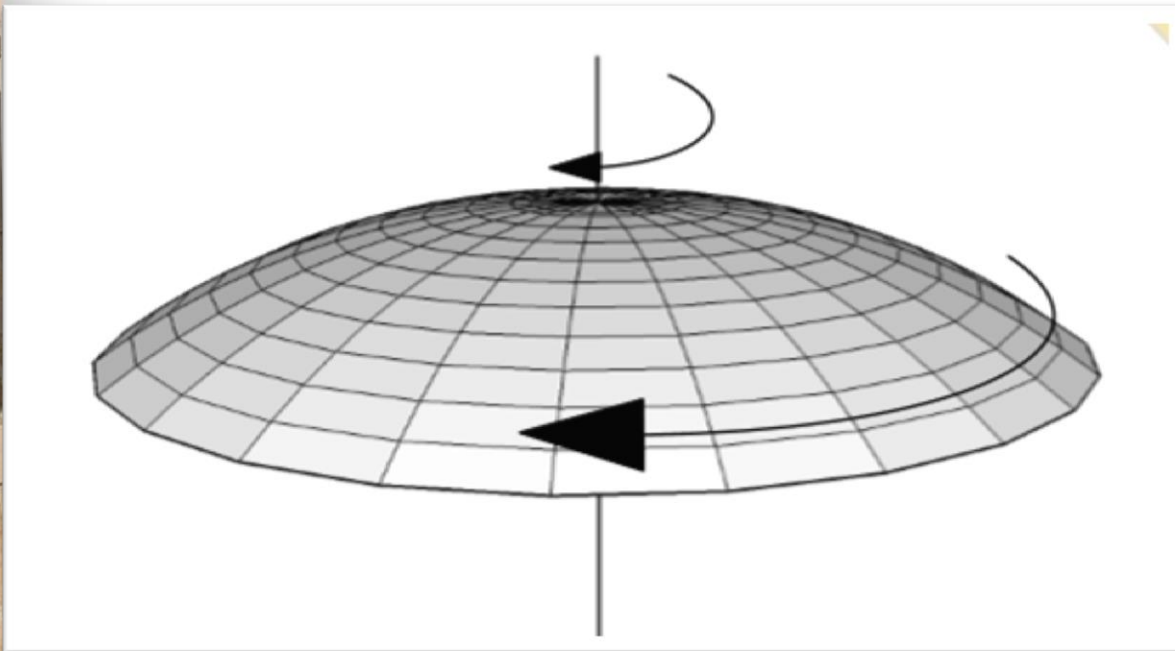
Pada rotation shell berbentuk hemisphere, garis-garis lengkung berbentuk setengah lingkaran. Terdapat kecenderungan *dome* akan stabil diatas tapi melendut dibagian bawah.



## ***b. Ellipsoid Dome***

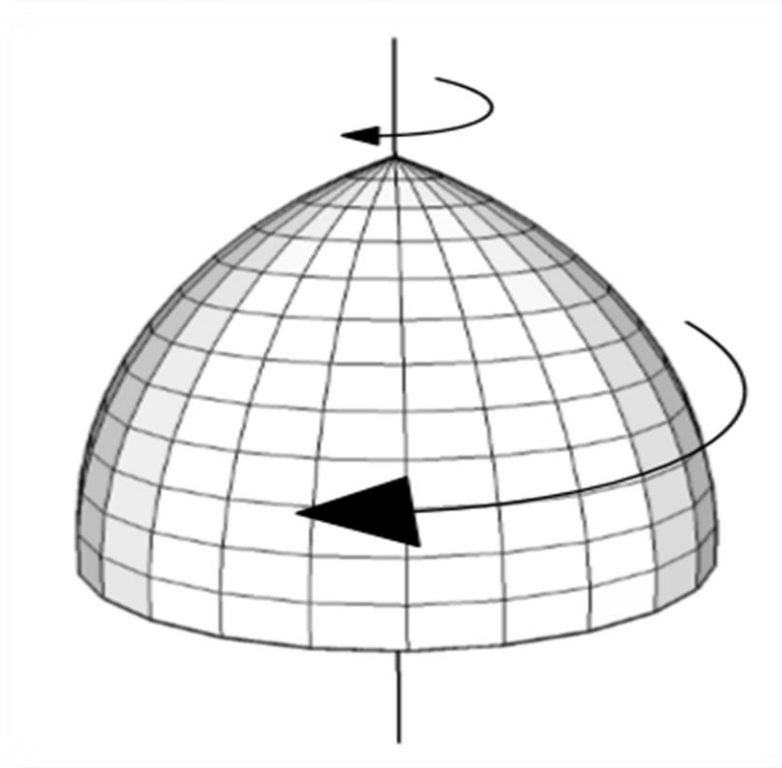
Bentuk *dome* yang lebih datar dibagian atas daripada bagian bawah.

Mampu menahan kecenderungan untuk melendut dibagian bawah sehingga **lebih bergantung pada ketegangan ring untuk stabilitas**



## c. *Paraboloid Dome*

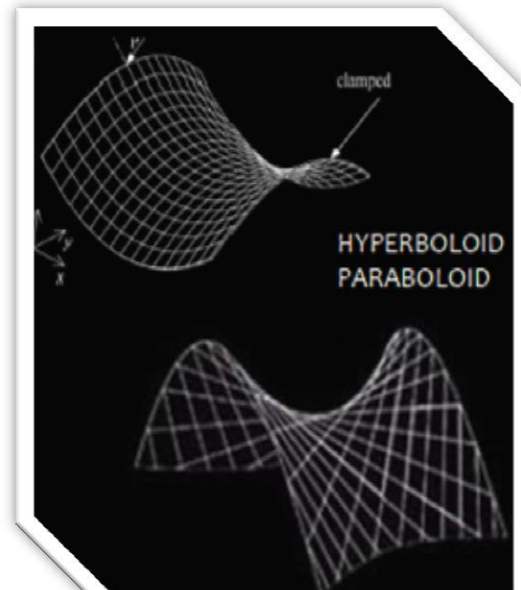
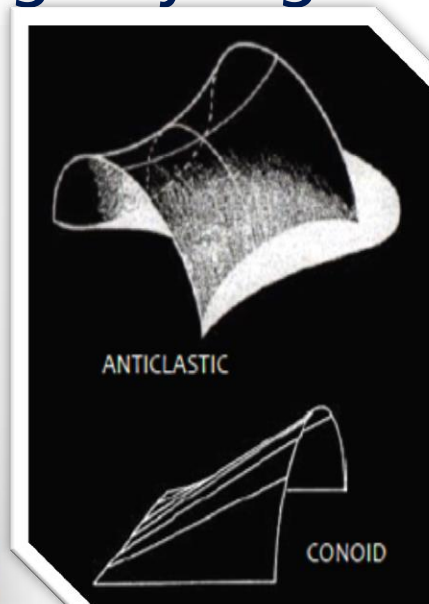
*Paraboloid dome* yang memiliki bentuk keatas memiliki kecenderungan yang lebih sedikit untuk melendut di bagian bawah dan menghasilkan tekanan ring/*hoop* yang lebih rendah.



## 2. *Anti-Clastic Shell System*

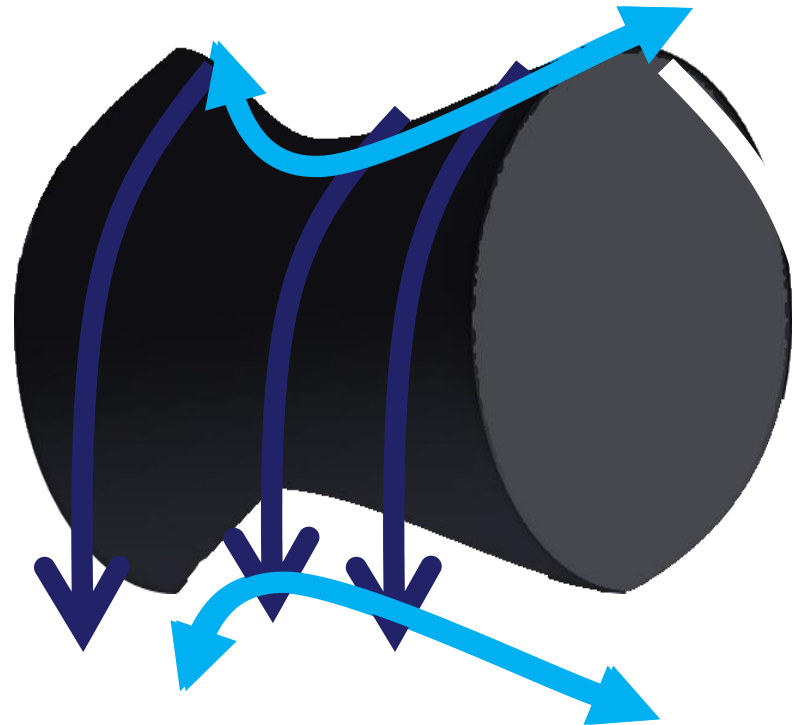
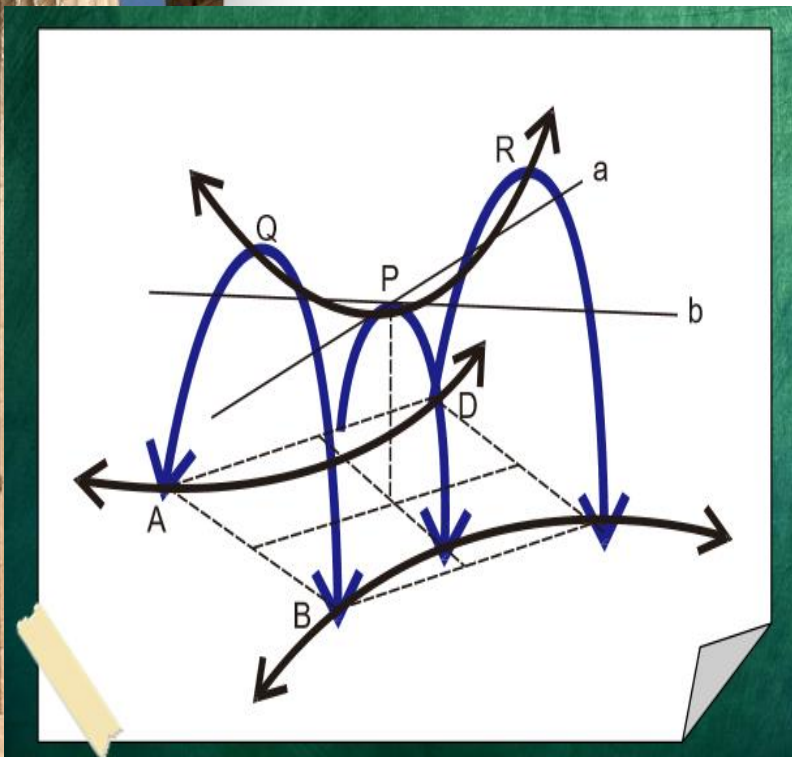
Sistem *anticlastic* biasanya terdapat pada bentuk struktur cangkang *Translational surface*, yaitu bidang yang diperoleh dengan garis lengkung yang datar digeser sejajar diri sendiri terhadap garis lengkung yang datar lainnya

Strukturnya berbentuk pelana dengan arah lengkungan yang berbeda pada setiap arahnya.

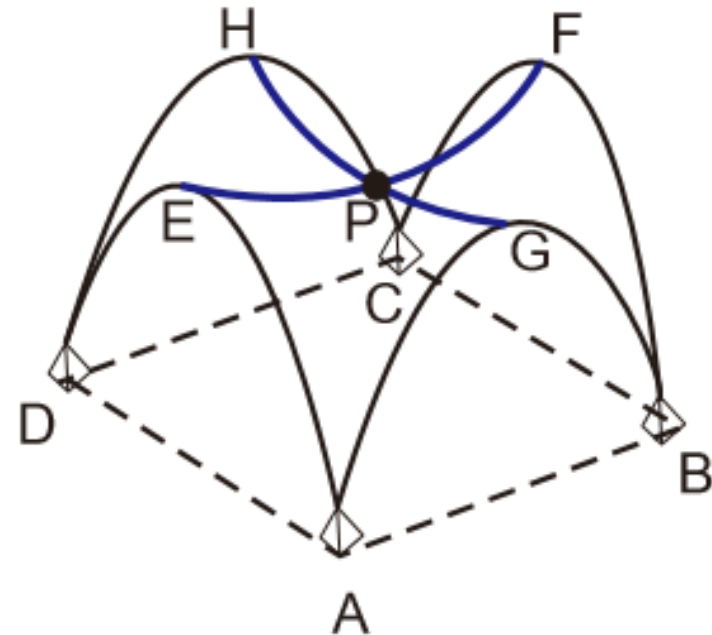
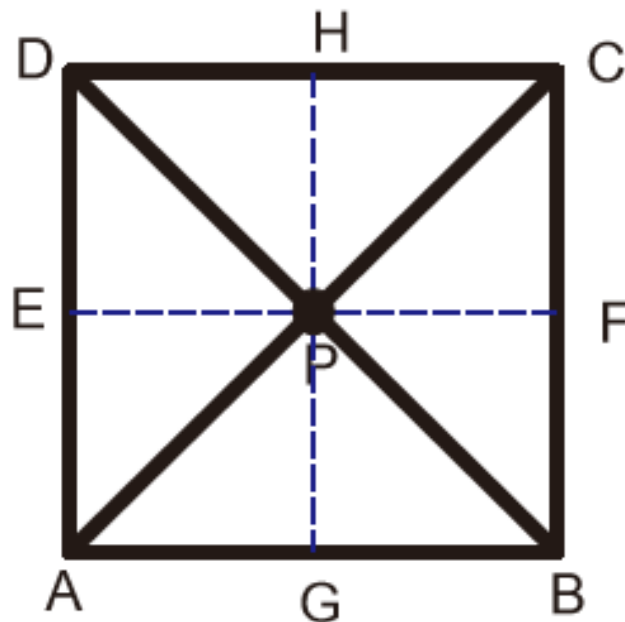
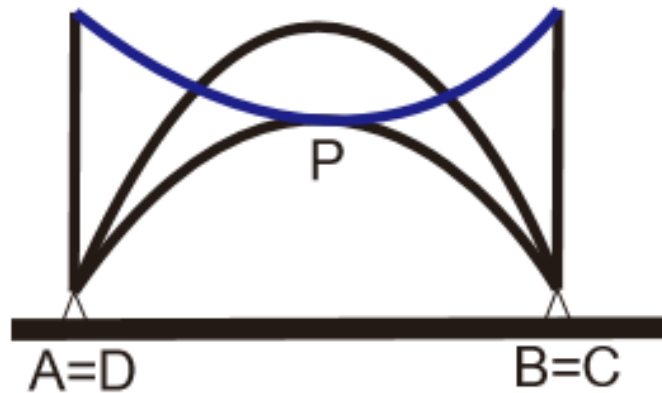


## a. Hyperbolic Parabolic (Hypar)

Merupakan suatu bidang geseran (*translational surface*) yang terbentuk jika kedua garis lengkung tersebut merupakan garis lurus yang saling bersilangan (*ruled surface*)



# a. Hyperbolic Parabolic (Hypar)



Intersecting hypars  
(2 hypar bersilangan)

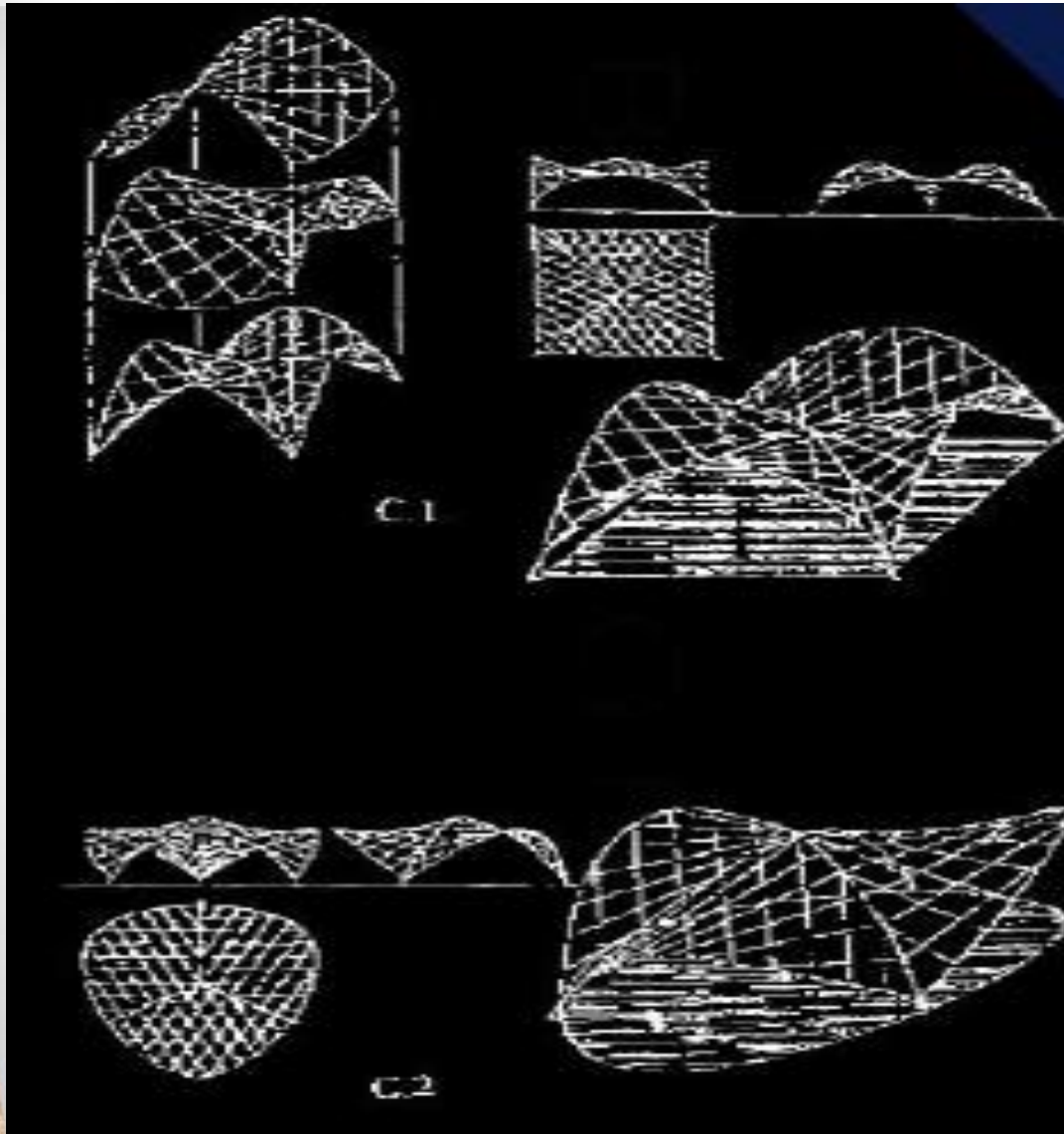
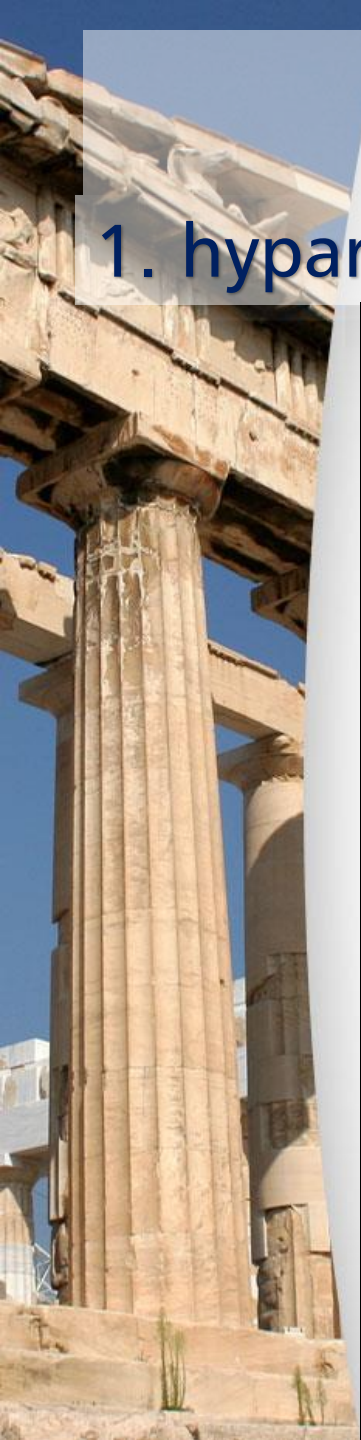
AED  
AGB  
BEC  
CHD

EF  
GH

ABCD :  
P: puncak parabola terendah

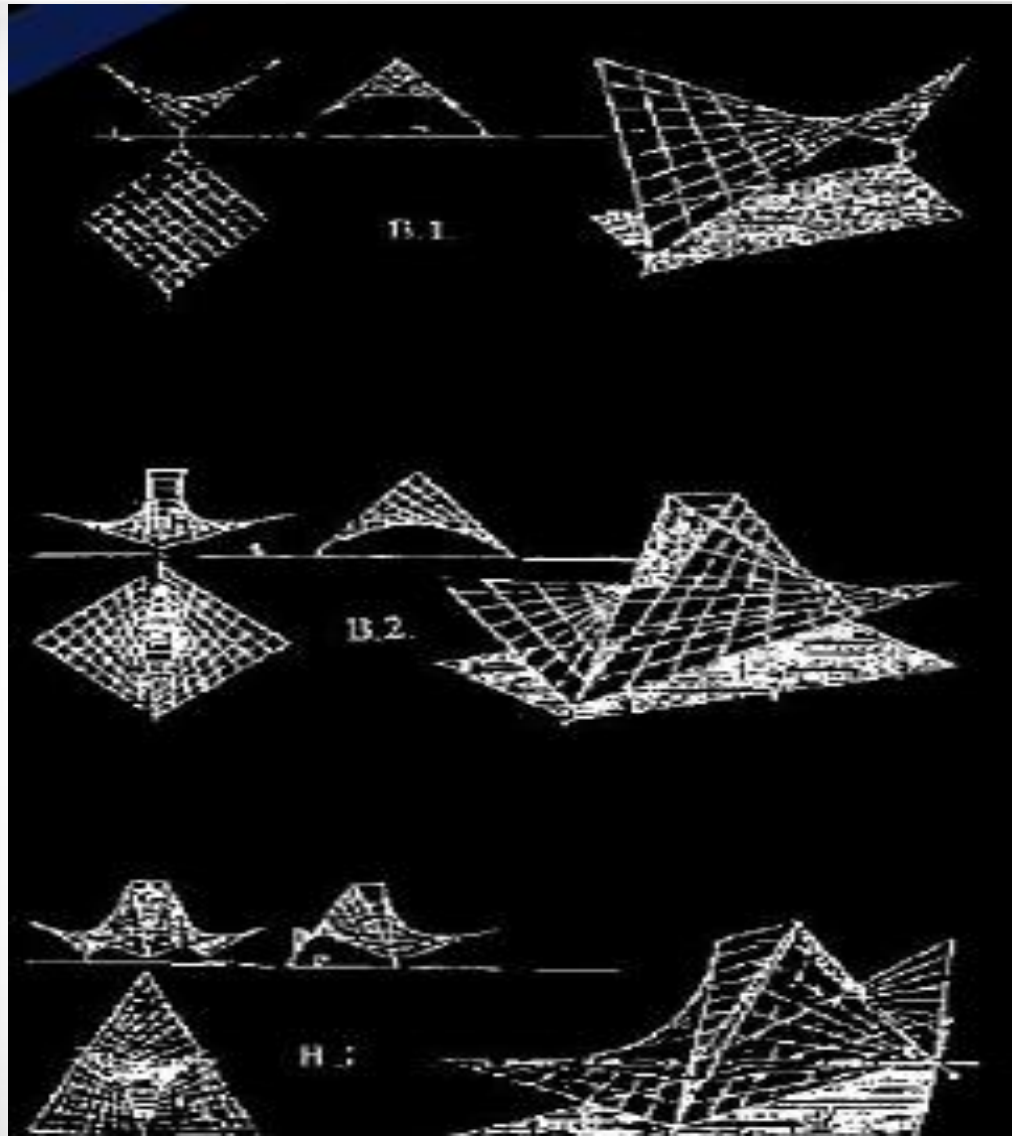
# Jenis-jenis *Hypar*

## 1. hypar with curved edges (tepi-tepi lengkung)



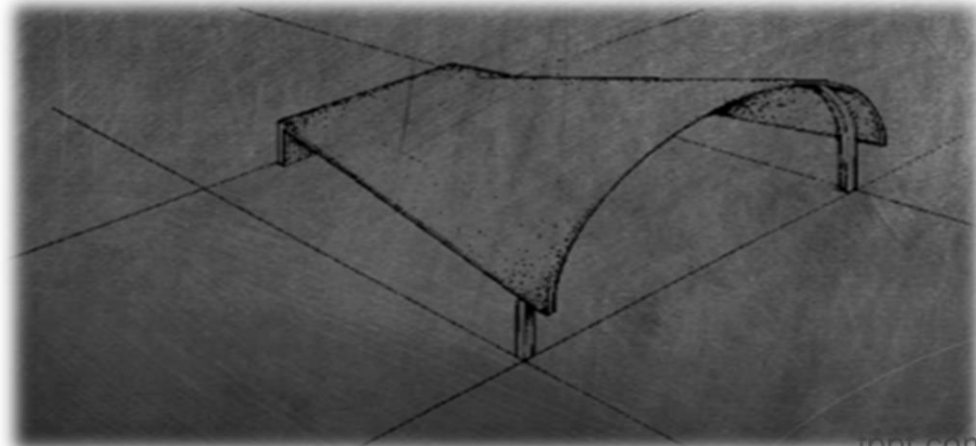
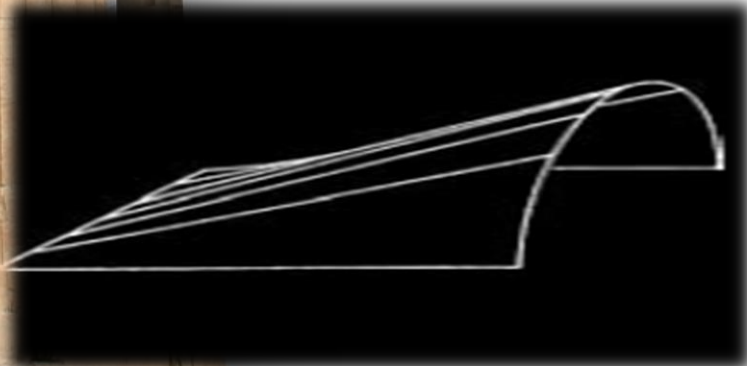
# Jenis-jenis *Hypar*

## 2. hypar with straight edges (tepi-tepi lurus)



## ***b. Conoid Shell***

- Sama seperti *hypar shell*, *conoid* merupakan bidang berbentuk pelana, namun **tegangan pada membrannya tidak sesederhana tegangan pada hypar**. Secara keseluruhan, *conoid* lebih susah terbentuk.
- Bidang *conoid* dapat dibentuk dengan memindahkan salah satu tepi mengikuti garis lengkung dan tepi yang lainnya mengikuti garis lurus





# ***Contoh Bangunan Dengan Struktur Shell***

# *Anticlastic Shell*



Nama	: Zarzuela Hipodrome
Fungsi	: Stadion Pacuan Kuda
Lokasi	: Madrid, Spanyol
Arsitek	: Carlos Arniches
Ahli Struktur	: Eduardo Torroja
Dibangun	: 1934-1941

# Zarzuela Hipodrome

Konsep pada awalnya diusulkan dengan atap datar, namun pada akhirnya diganti dengan lembaran atap silinder.

Adanya lengkungan pada bagian ujung, membentuk bagian pendukung yang berperan seperti kantilever

Salah satu struktur atap bangunan yang terkenal sebagai struktur cangkang *hyperbolic paraboloid*. Susunan kantilevernya menjadikan kolom penunjang utama berada di bagian belakang kursi penonton, sehingga tidak ada yang menghalangi pandangan penonton ke area pacuan kuda.

# Zarzuela Hipodrome

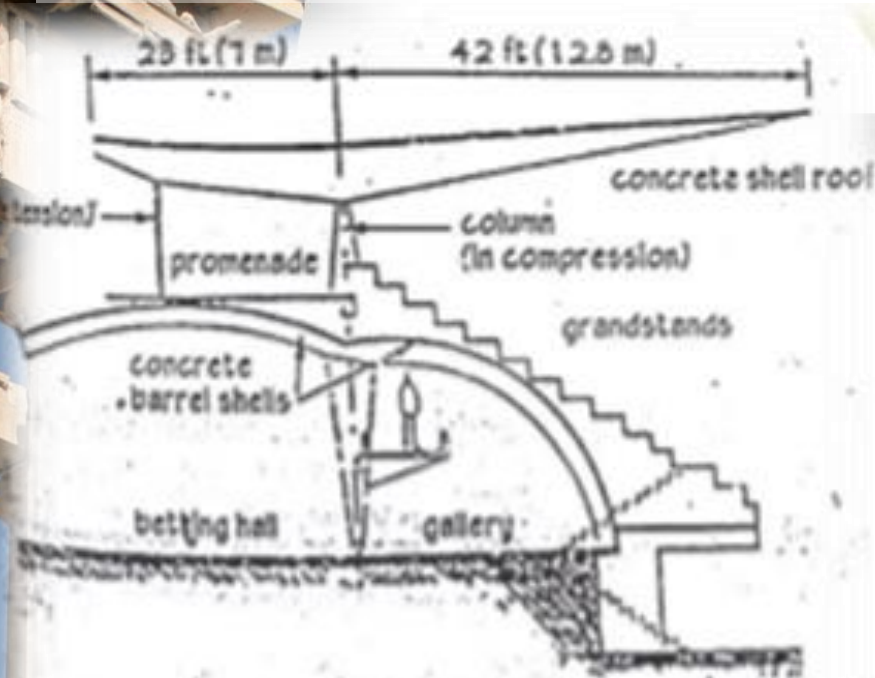
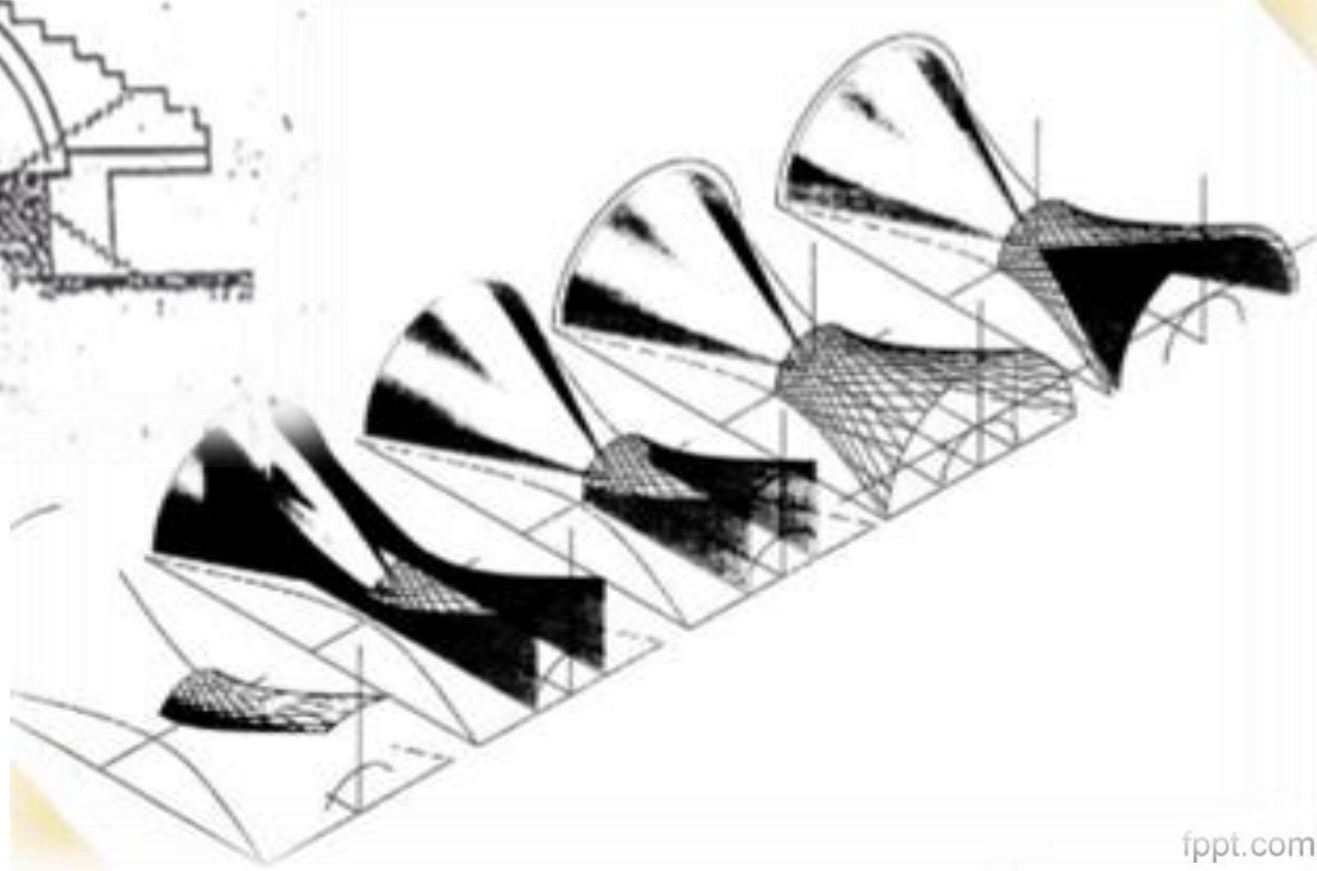


Fig. 15.35: Zarzuela Hippodrome, section.



# Zarzuela Hipodrome

## Gaya & pembebanan

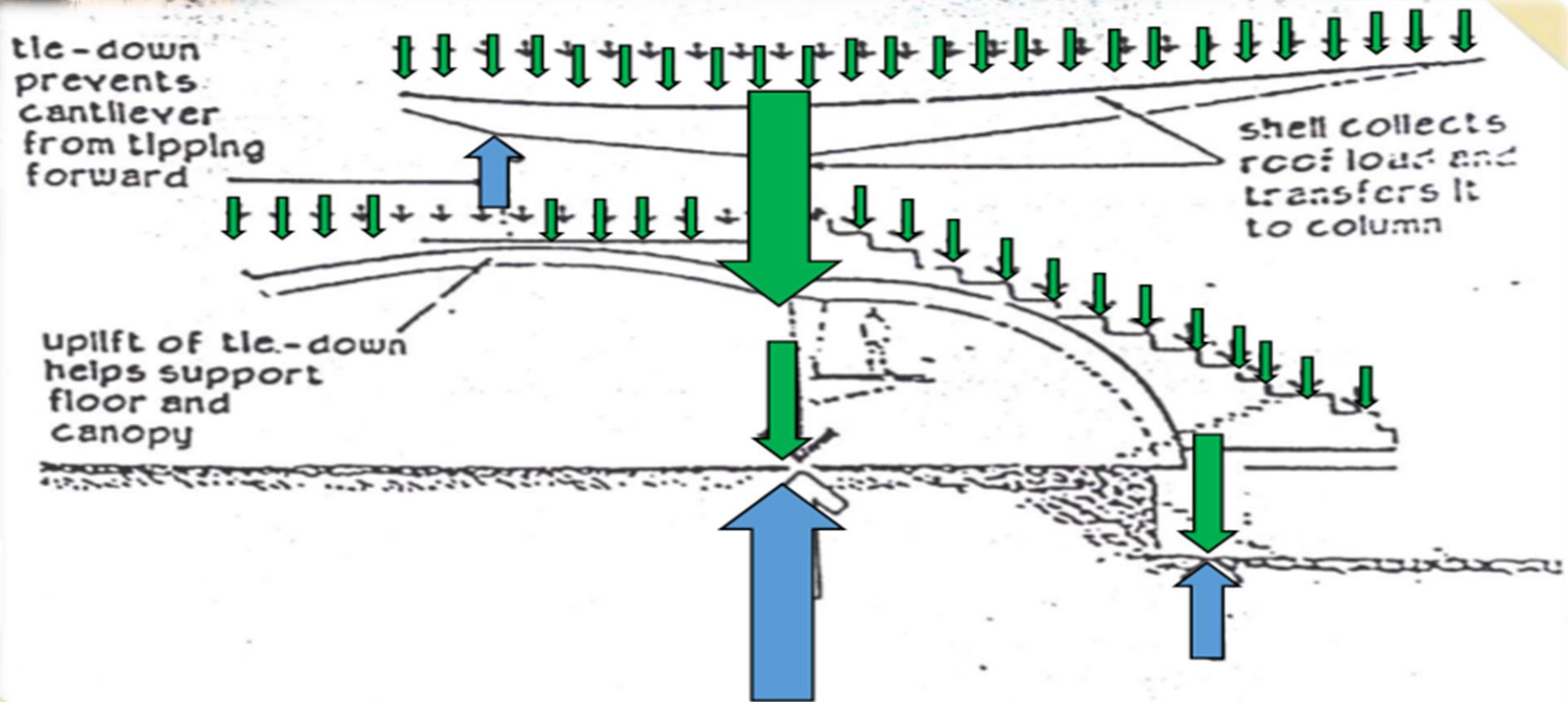
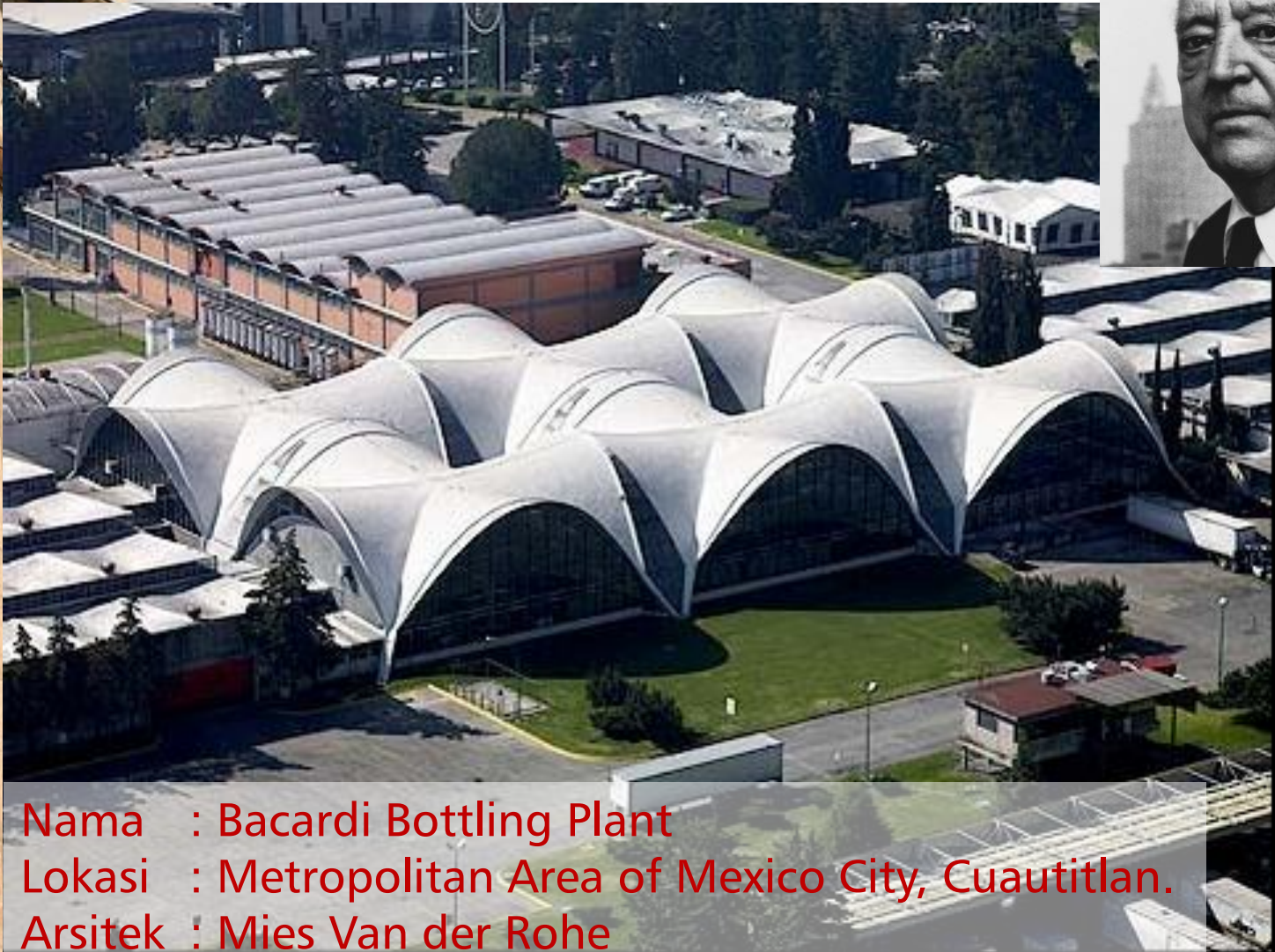


Figure 15.36: Zarzuela Hippodrome, load path diagram.

# *Single Curved Shell System*

## BACARDI BOTTLING PLANT



Nama : Bacardi Bottling Plant

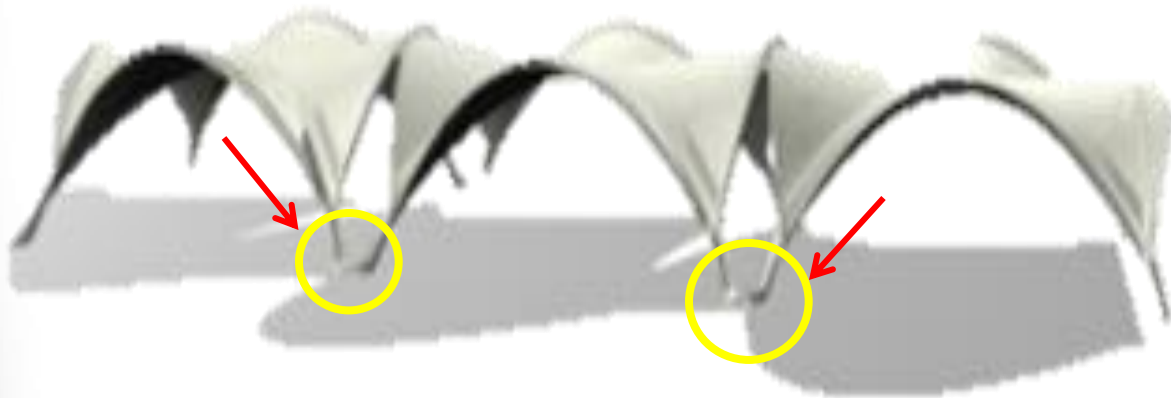
Lokasi : Metropolitan Area of Mexico City, Cuautitlan.

Arsitek : Mies Van der Rohe

# Bacardi Bottling Plant

Cangkang Bacardi tidak terhubung ke pondasi, setiap ujung dari keempat sudutnya didukung oleh kaki yang mengirim beban dari kubah ke pondasi, yang disalurkan ke tanah.

Baja yang berputar untuk menghubungkan pondasi dapat menahan beban horizontal dan penahan-penahan ini tersembunyi dari pandangan.



# Bacardi Bottling Plant

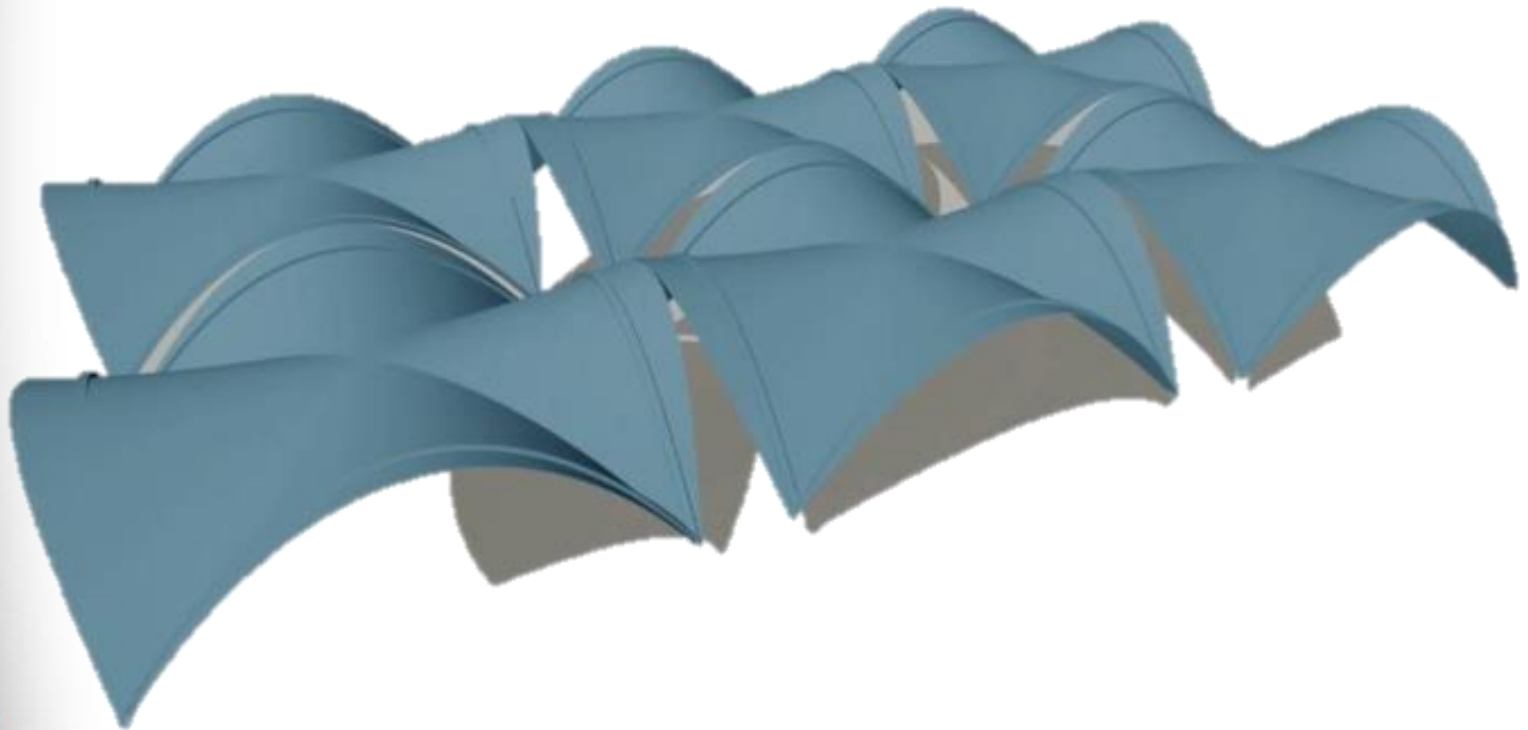
Lengkungan-lengkungan diletakkan secara langsung di dinding kaca untuk memastikan jika terjadi tekanan angin yg tidak terduga, cangkang cukup kaku untuk menahan kristal agar tidak bergerak.

Dalam konstruksi ini, material yg digunakan adalah kubah beton, struktur, baja dan jendela besar sebagai pencahayaan alami.



# Bacardi Bottling Plant

Bacardi Bottling Plant terdiri dari 6 lengkungan yg terletak sejajar 3 baris membentuk sebuah persegi. Setiap bagiannya tersusun atas 4 lengkungan yg terhubung ke tanah secara diagonal.



# *Teater Imax Keong Mas, TMII*

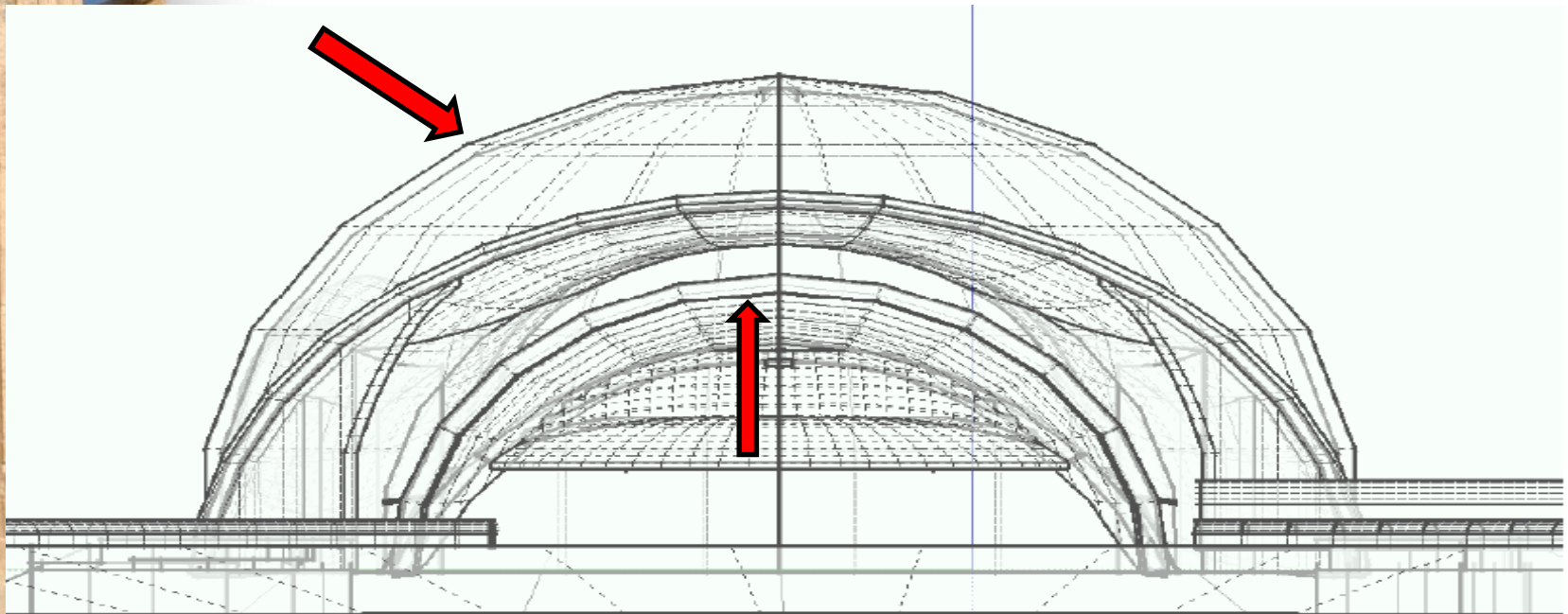


Didirikan atas prakarsa Almh Hj. Ibu Tien Soeharto, mulai dioperasikan 20 April 1984.

Menayangkan film (audio-visual) pada layar raksasa dengan menggunakan kecanggihan teknologi sinematografi modem Proyektor IMAX dengan memutar film "Indonesia Indah".

# Teater IMAX Keong Mas

- Kubah berstruktur cangkang, menjadi bangunan kubah beton terbesar di Indonesia dengan bentangan/diameter 46m.
- Ketebalan beton kubah adalah 15 – 20cm, tebal 20cm pada bagian bawah sebagai penahan beban terbesar & tebal 15 cm di bagian atas.



# Teater IMAX Keong Mas

Struktur kanopi adalah sistem shell hiperbolik parabola (hypar) dengan konstruksi beton tekan 3 dimensi menggunakan rib baja tarik & pengisi bidang kaca khusus.

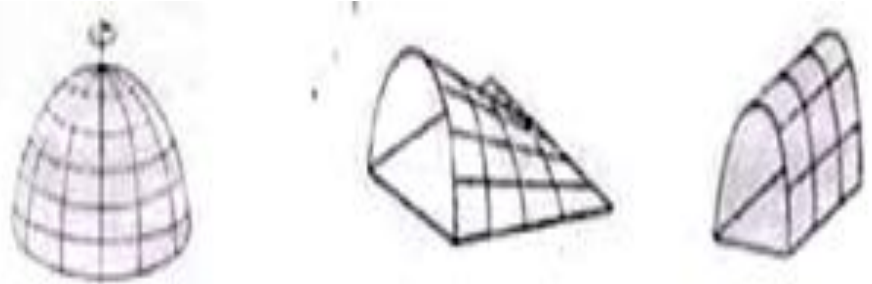
Di lobi terdapat kolom untuk menopang bidang shell yang tidak menyentuh tanah, agar gaya-gaya beban statis & dinamis tetap tersalur ke tanah.



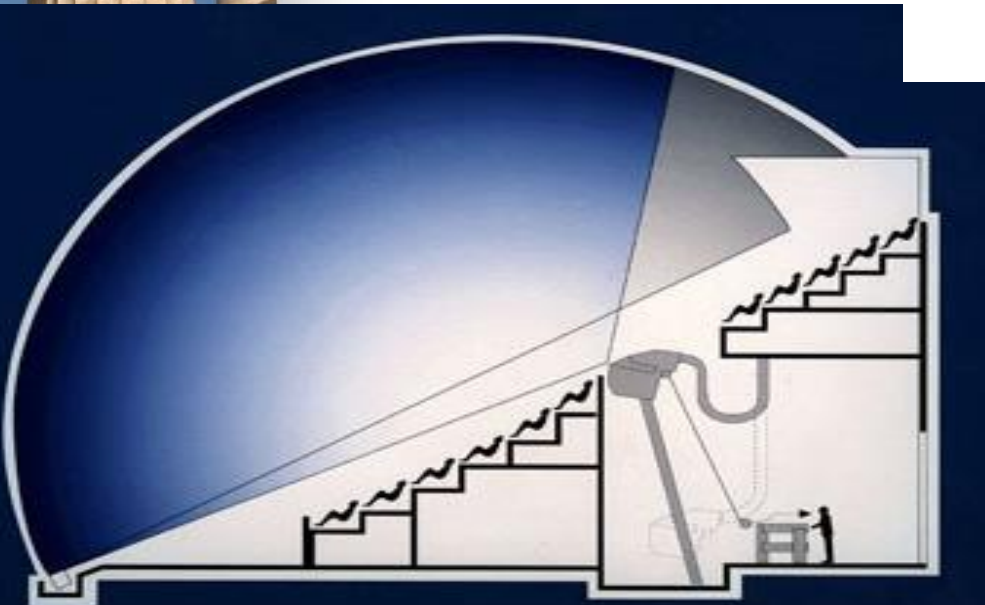
# Teater IMAX Keong Mas

Ada 3 struktur shell yang digunakan:

1. *Rotational Surface Shell*
2. *Hyperbolic Parabolic Shell*
3. *Single Curved Shell*



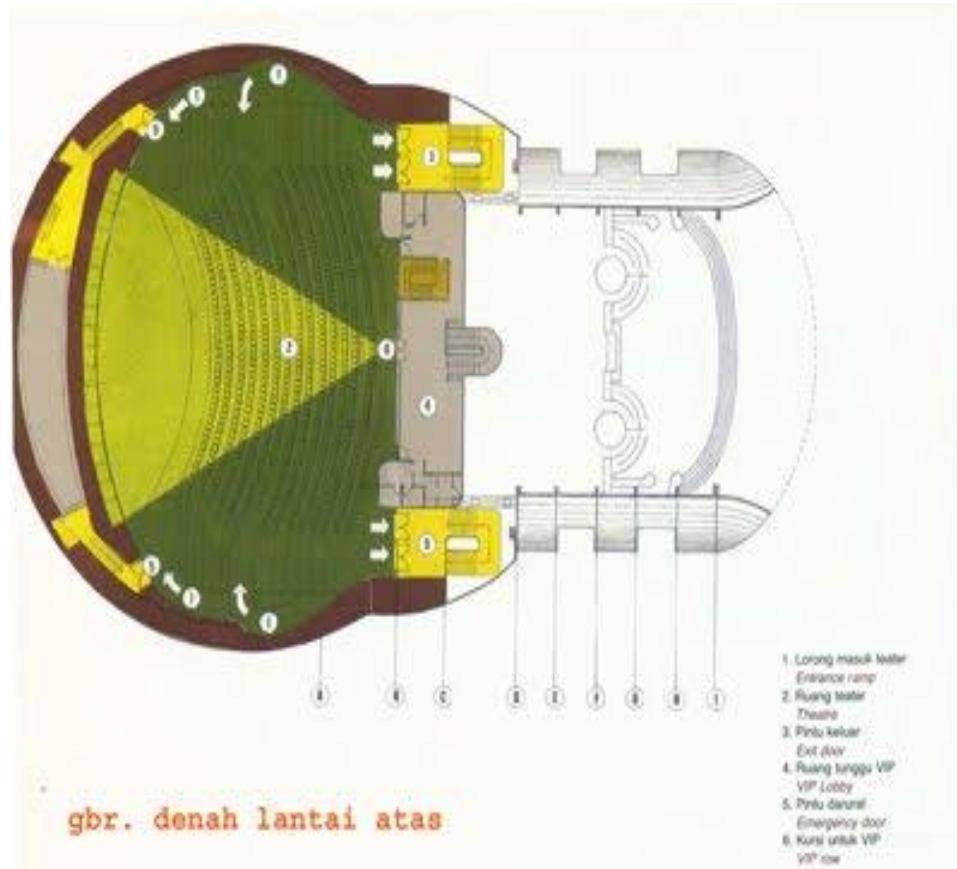
Gambar 4.19. Jenis-jenis struktur shell (a) struktur shell rotasi, (b) struktur shell hiperbolis, (c) struktur shell kurva tunggal



# Teater IMAX Keong Mas

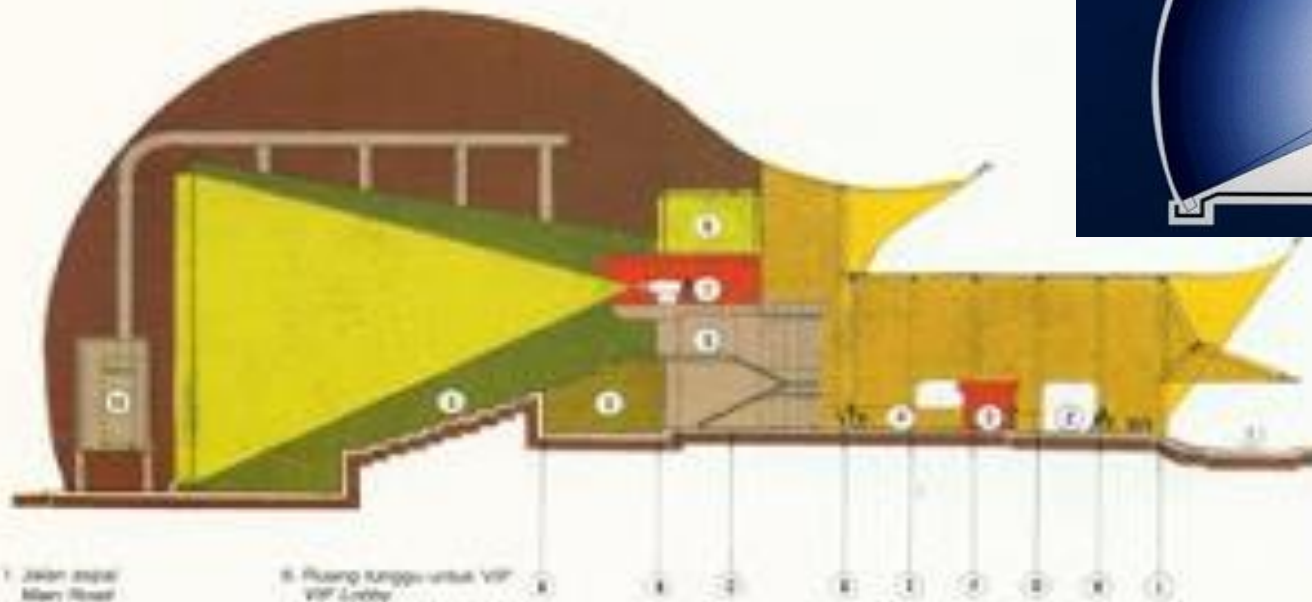
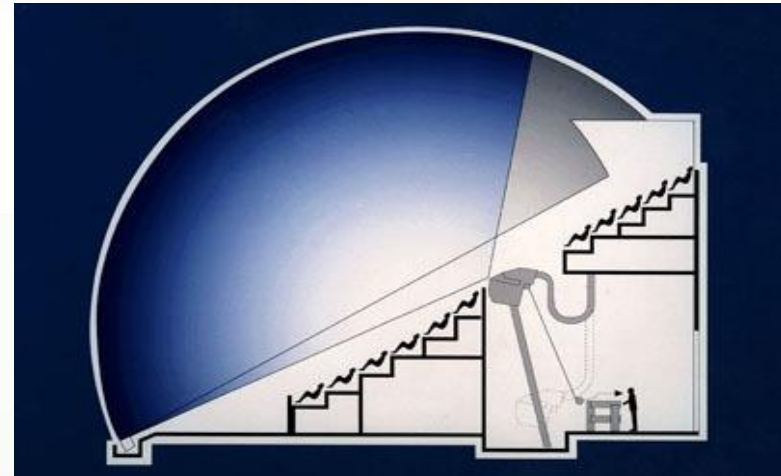
Terdapat hall besar berbentuk lingkaran sebagai tempat untuk bioskop.

Bentuk dari bangunan menyerupai keong mas yang diambil dari sebuah cerita lakon cerita panji.



# Teater IMAX Keong Mas

Apabila dilihat dari potongan bangunan, atap di bagian bioskop berbentuk setengah lingkaran.



1. Jalan masuk  
Main Road
2. Aula Lobi  
Outdoor aula
3. Perjualan tiket  
Ticket box
4. Aula dalam  
indoor aula
5. Ruang theater

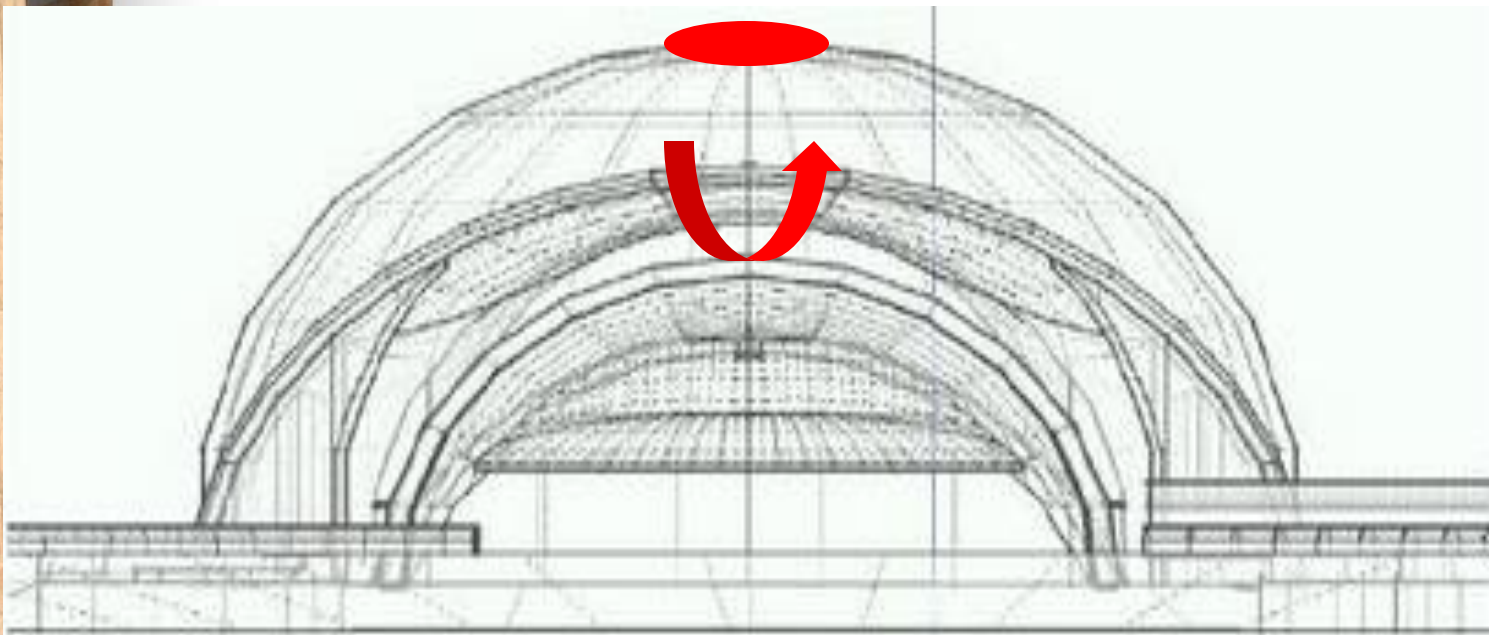
6. Ruang tunggu untuk VIP  
VIP Lobby
7. Ruang proyeksi  
Projector room
8. Kantor pengelola  
Manager office
9. Ruang mesin  
Machine room
10. Ruang mesin AC  
AC machine room

gbr. potongan

# Pembebanan

Gaya-gaya dalam bidang berarah meridional disebabkan oleh beban penuh.

Tekanan oleh gaya-gaya melingkar tidak membuat momen lentur pada arah meridional, sehingga shell bisa memikul beban hanya dengan tegangan-tegangan bidang



# Penyaluran gaya

Gaya meridional berasal dari beban itu sendiri yang disalurkan melalui tulangan baja ke kolom penyangga.

Gaya meridional pada atap diatasi dengan mempertebal permukaannya.



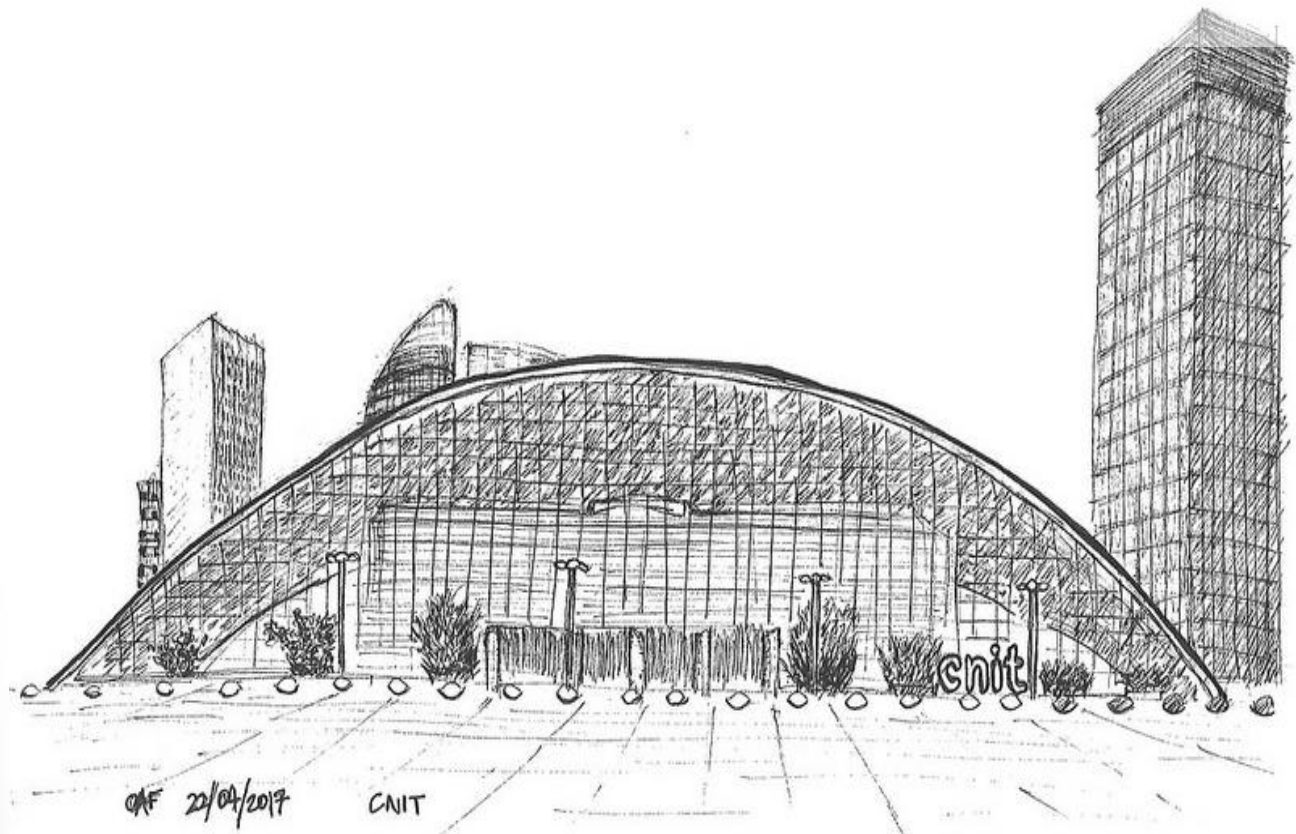
# *Center of New Industries & Technology*



Jenis & Fungsi : Exhibition & convention Center  
Arsitek : Robert Edouard Camelot, Jean de Mailly, Bernard Zehruss-Jean, Prouve  
Bentang : 218 m  
Tinggi plafon : 46 m

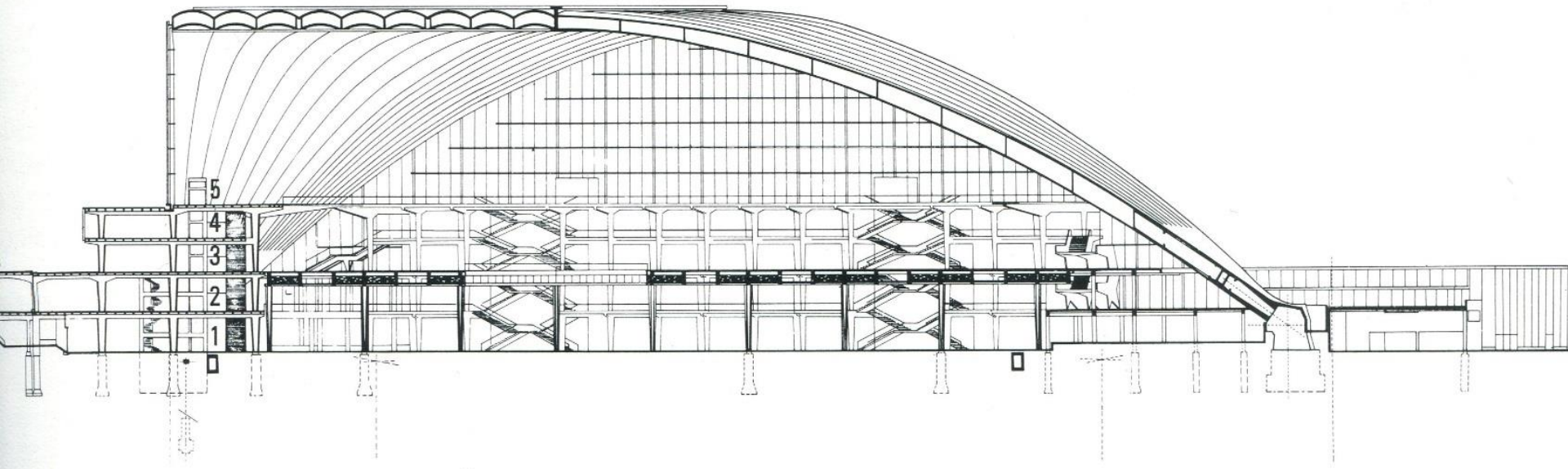
# konsep

Insinyur Nicolas Esquillan terinspirasi oleh kubah gothic dengan tulang rusuk untuk memecahkan masalah yang ditimbulkan oleh struktur atap segitiga.

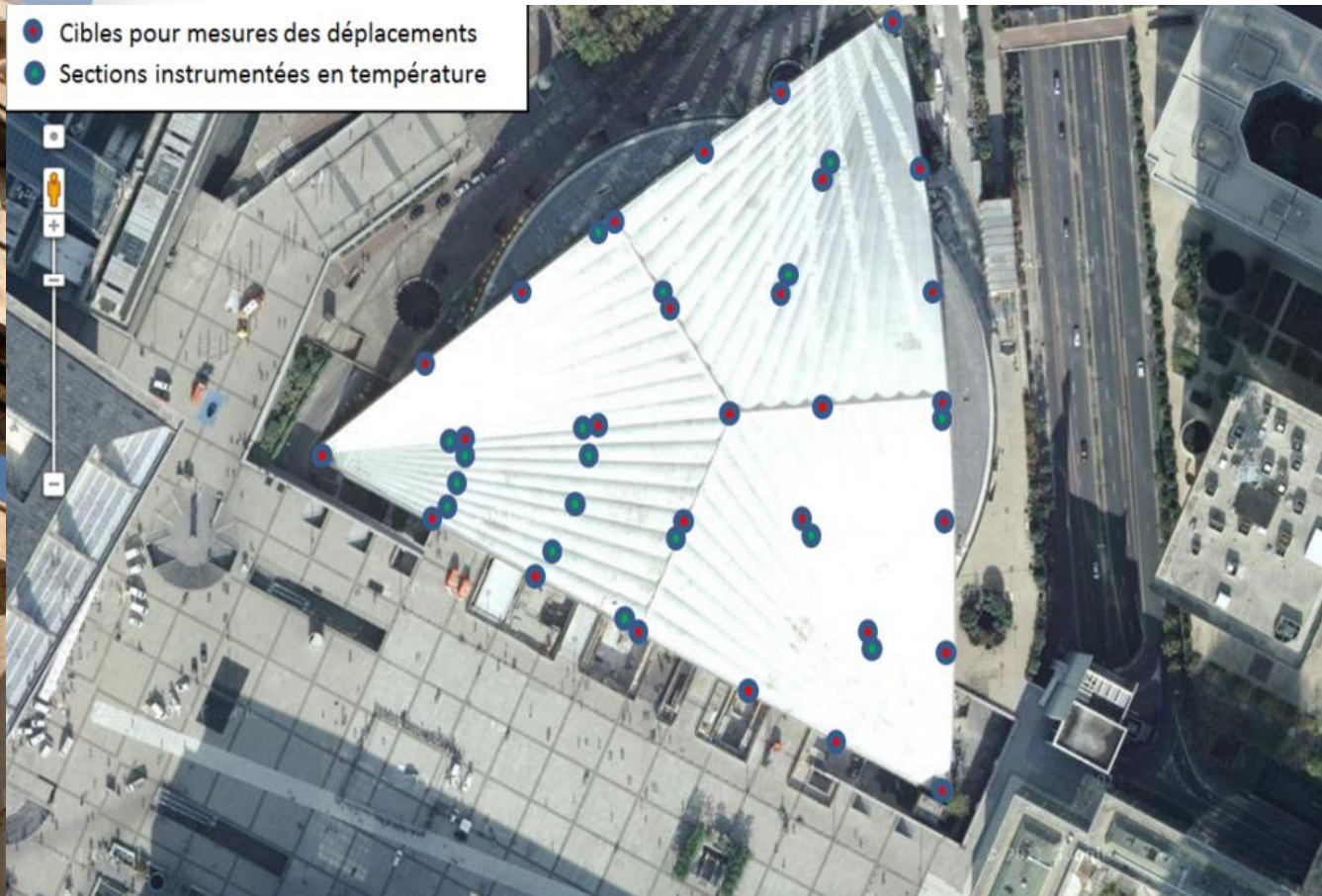


# CENTER OF NEW INDUSTRIES AND TECHNOLOGIES

## Potongan bangunan



# CENTER OF NEW INDUSTRIES AND TECHNOLOGIES



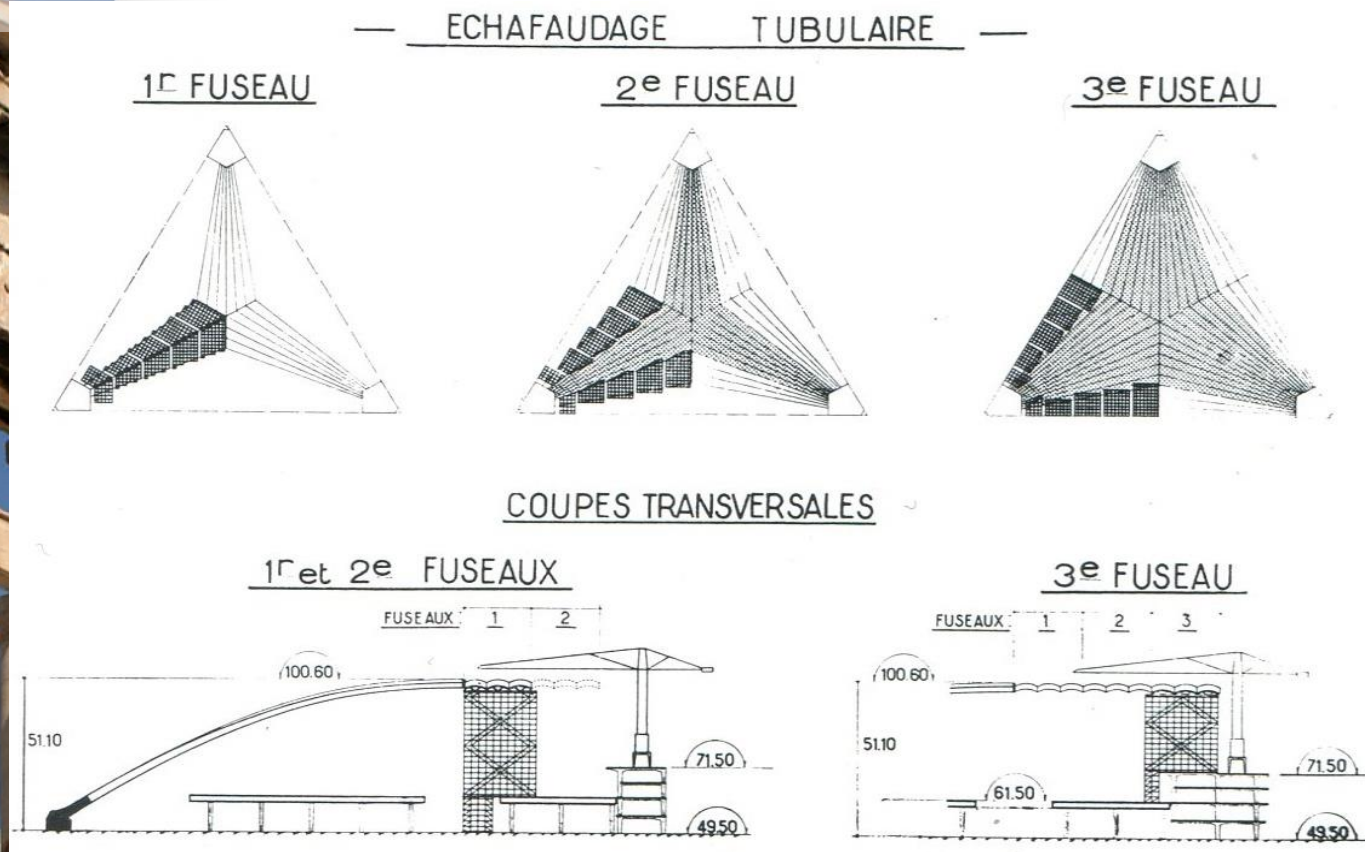
Kubah beton dibangun tanpa dukungan apapun dibawahnya. Struktur didukung pada 3 titik / pilar yang terletak pada simpul segitiga sama sisi dengan jarak 218m antar sisinya. Tingginya 50 meter dan mencakup volume 900.000 m<sup>3</sup>, dan bebas dari daya dukung apapun atau pilar.

# CENTER OF NEW INDUSTRIES AND TECHNOLOGIES



Prinsip simpul ini diambil secara langsung untuk mendukung upaya titik-titik konvergensi arah, yaitu menuju jalur yang paling lemah. Keseimbangan lengkungan kubah berada di dasar, pada lengkungan dan bagian atas. Tiap bagian yg memiliki *eardrum* menahan lengkungan yang berlawanan di tiap sisi sehingga terpusat pada bagian tengah.

# CENTER OF NEW INDUSTRIES AND TECHNOLOGIES



**Pembuatan kubah terdiri dari 3 fase, yaitu :**

1. Membangun format bintang berujung tiga, terlihat dari atas.
2. Membuatnya dalam tiga elemen, satu di depan masing-masing dan berlanjut dari yang sebelumnya.
3. Menghilangkan perancah dan hanya menggunakan reaksi pilar dan *eardrum*.

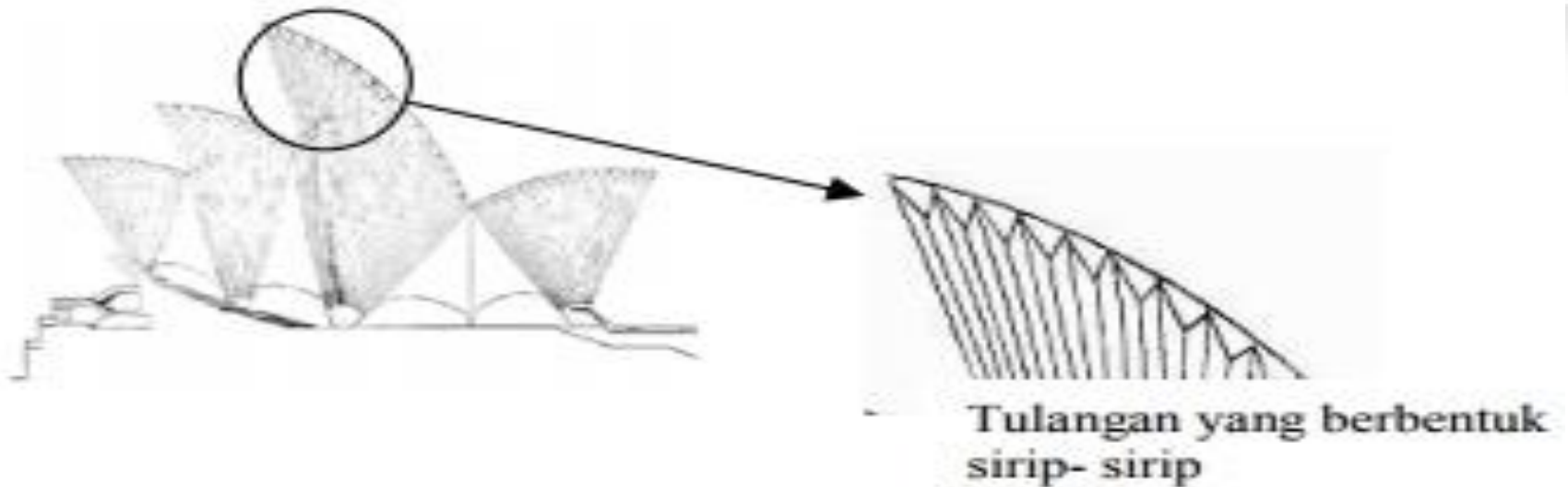
# *Sydney Opera House*



Lokasi	: Sydney, Australia
Arsitek	: Jorn Utzon
Tahun Berdiri	: 1958
Fungsi	: Gedung Pertunjukan Seni

# Sidney Opera House

## Sistem struktur

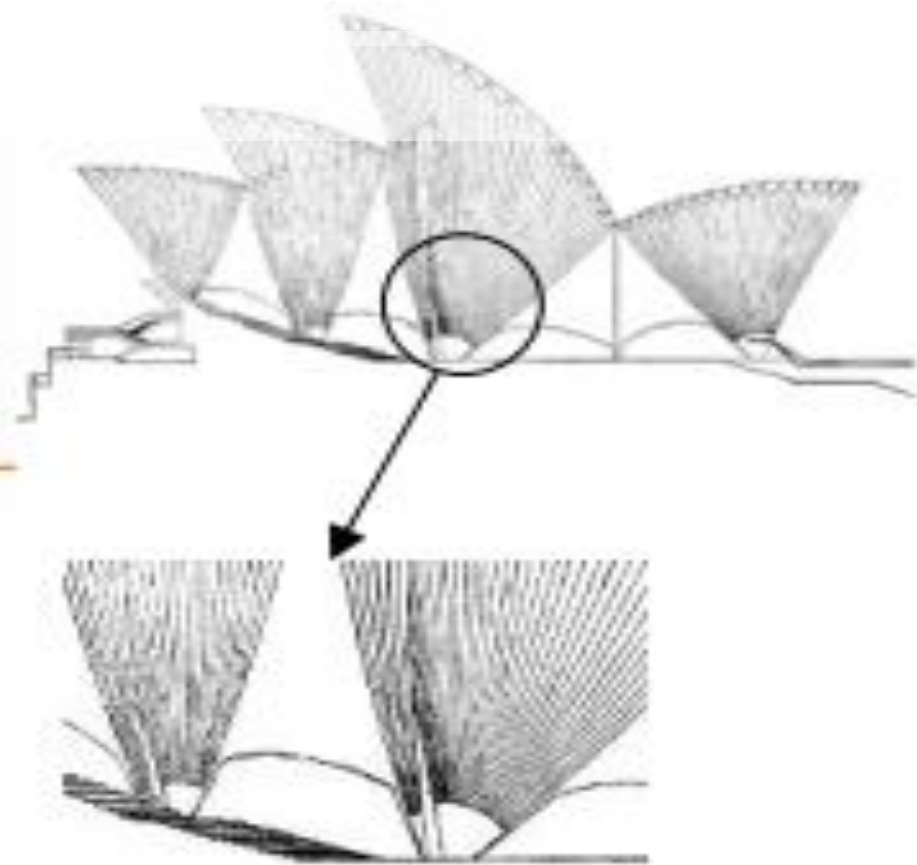
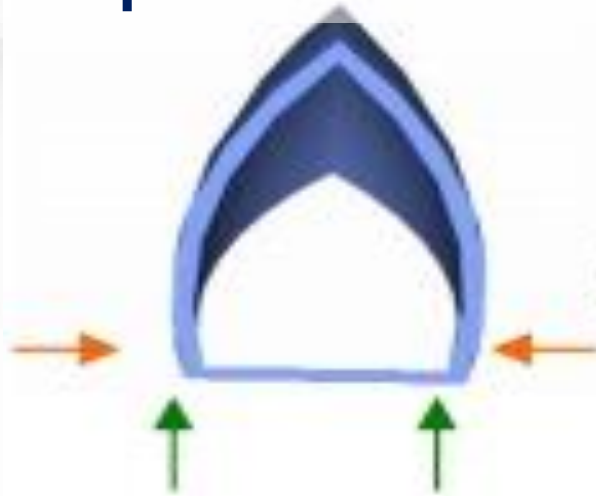


*Shell* pada Sydney Opera House terbentuk dari proses rotasional kearah vertikal dengan lengkung dua arah (*vertical & horizontal*)/ *double curved shell* dengan permukaan lengkung sinklastik. Dan gaya yang bekerja antara lain adalah :

- Gaya mereditonal
- Gaya rotasional
- Beban Lentur
- Kondisi Tumpuan

# *Sidney Opera House*

## Kondisi Tumpuan

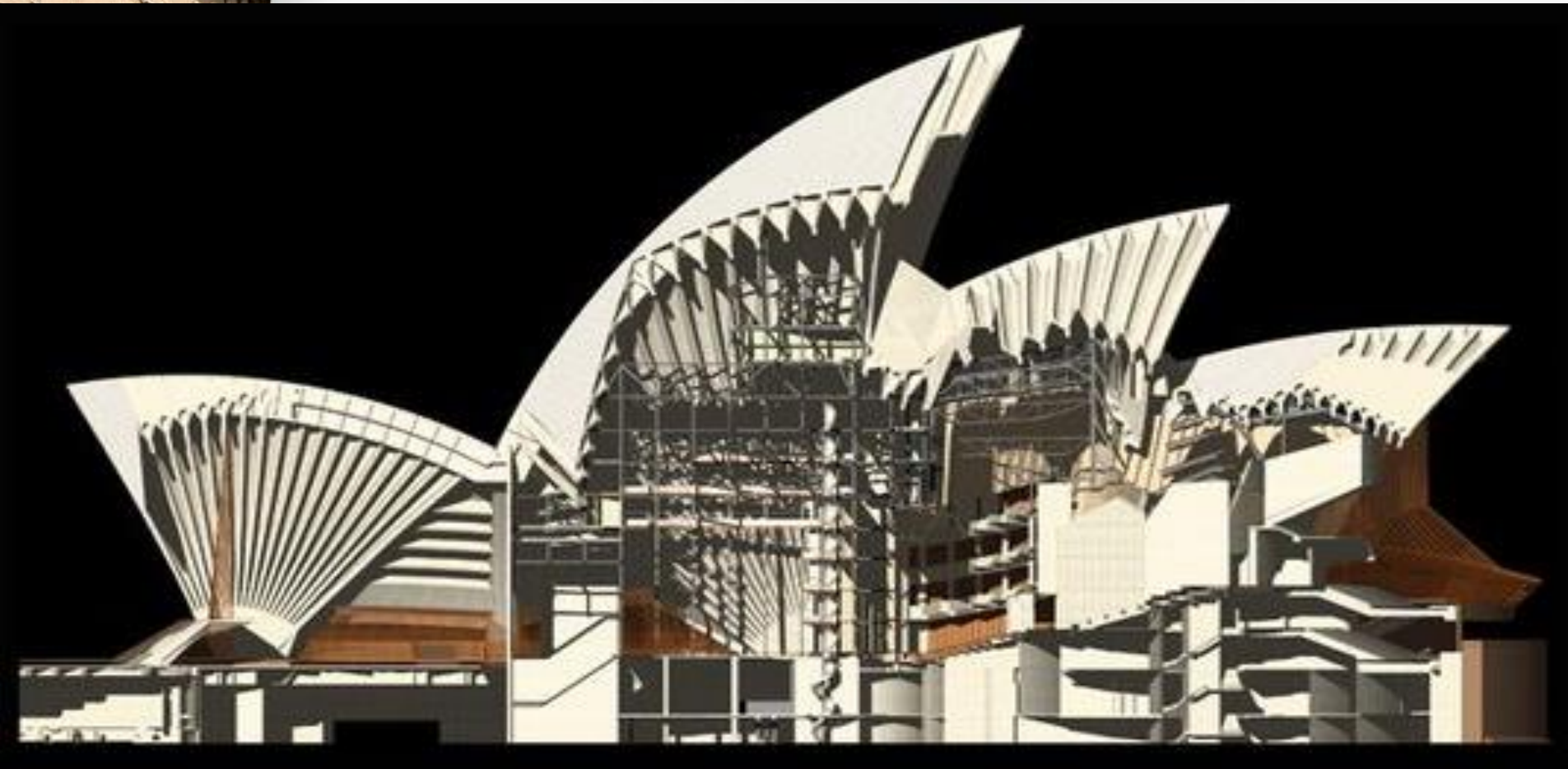


Penebalan pada kaki  
tumpuan atap

- Tumpuan yang disalurkan ke kolom mampu mengarahkan reaksi dari membran baik reaksi tekan maupun tarik. Perpindahan gaya tekan tarik yang bekerja pada permukaan cangkang.
- Perpindahan- perpindahan membran pada perbatasan shell yang timbul akibat tegangan dan regangan membran diatasi dengan memperkaku sudut- sudut pertemuan permukaan shell.

# *Sidney Opera House*

## Potongan Detail



# *Sidney Opera House*

Tampak Timur



# *Sidney Opera House*

Tampak Barat



# *Sidney Opera House*

Tampak Selatan



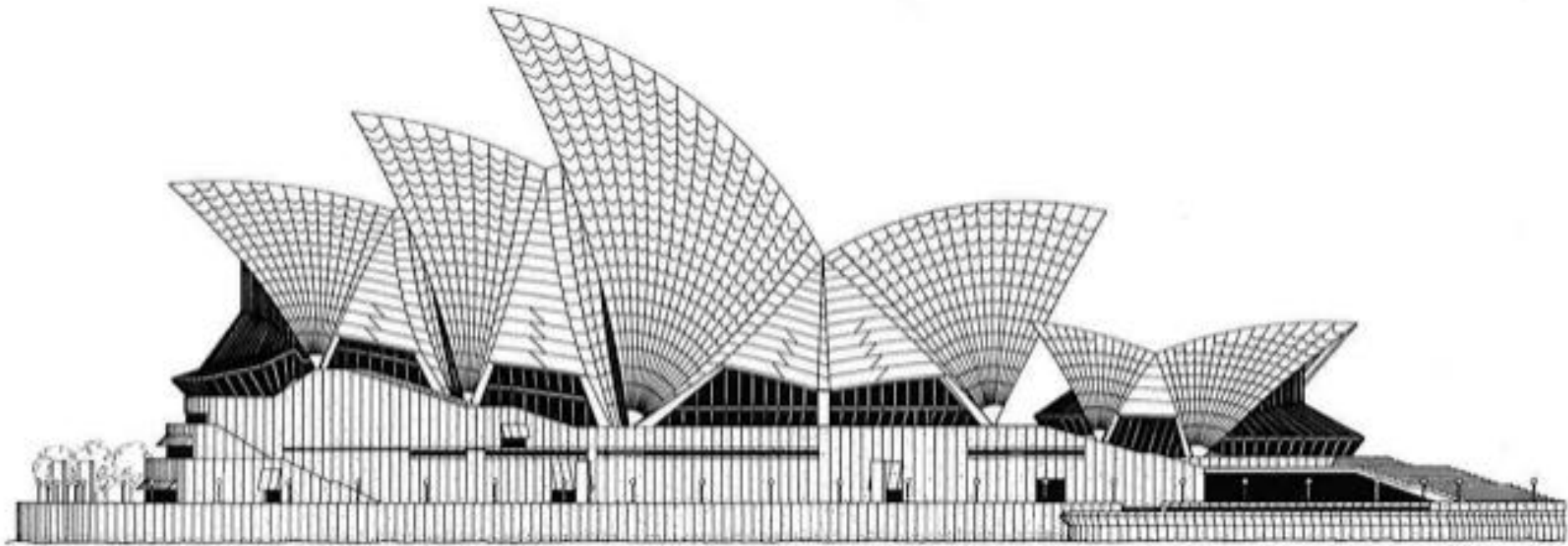
# *Sidney Opera House*

Tampak Utara



# *Sidney Opera House*

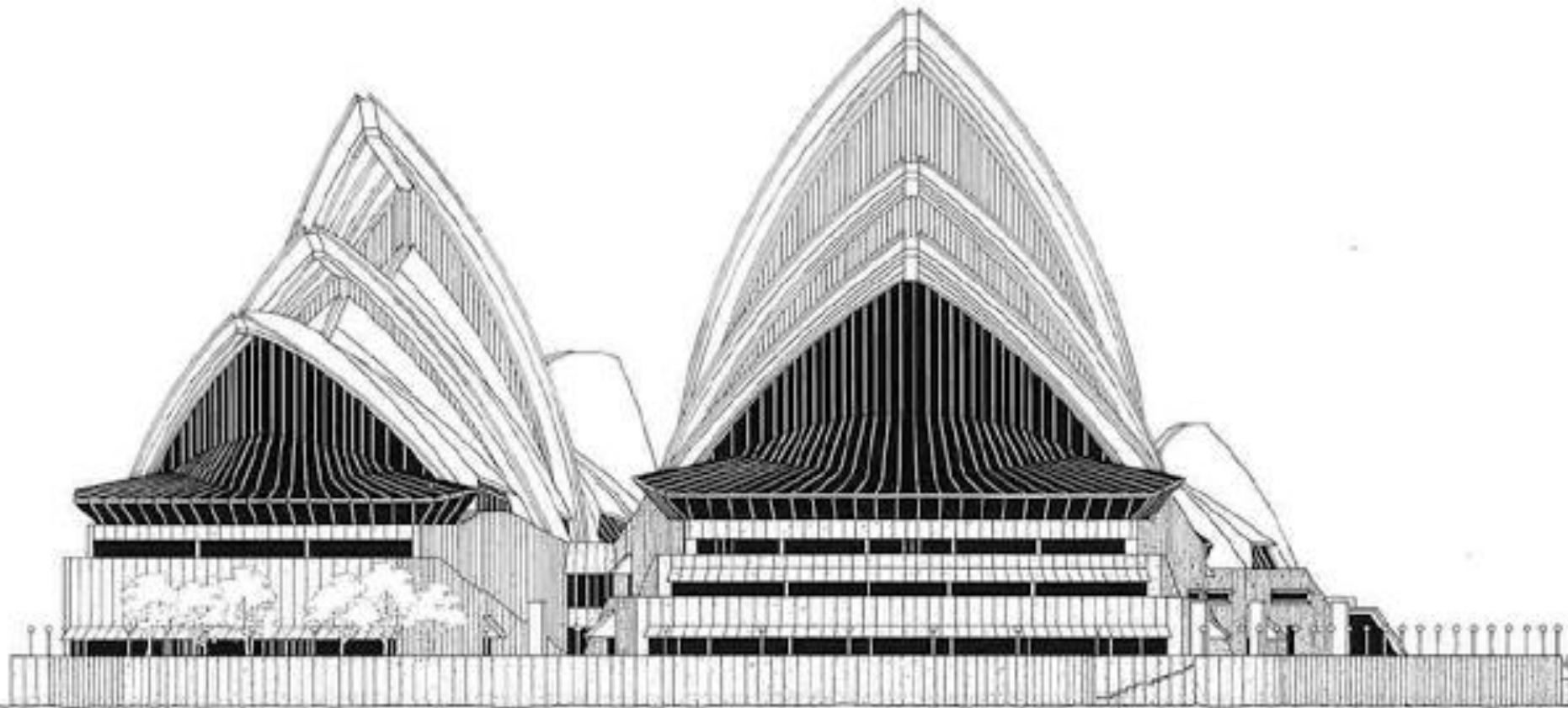
## Tampak Barat Detail



West elevation of Concert Hall. All the black areas are glass walls.

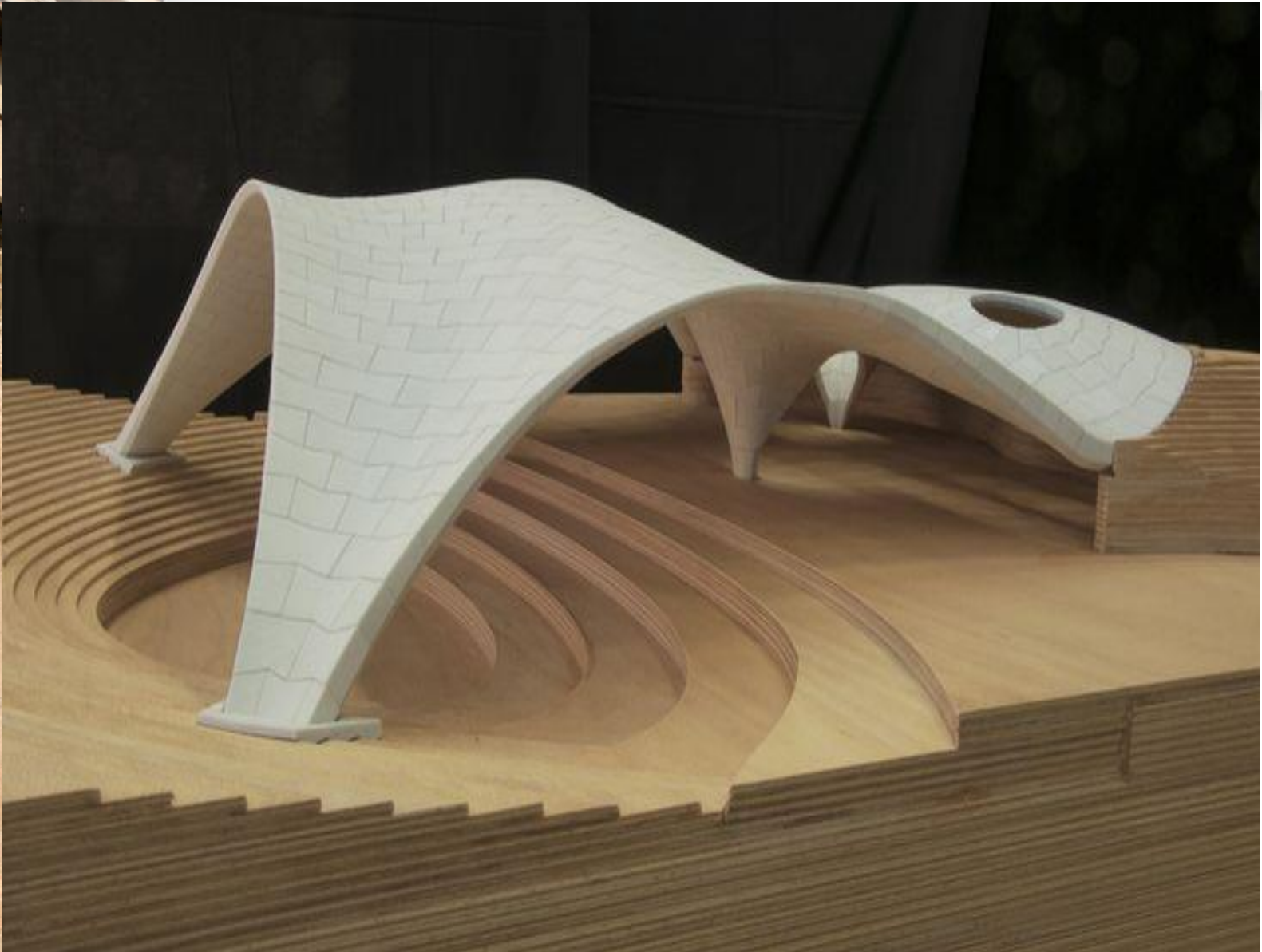
# *Sidney Opera House*

## Tampak Utara Detail



North elevation of the Theatre (left) and Concert (right) Halls.

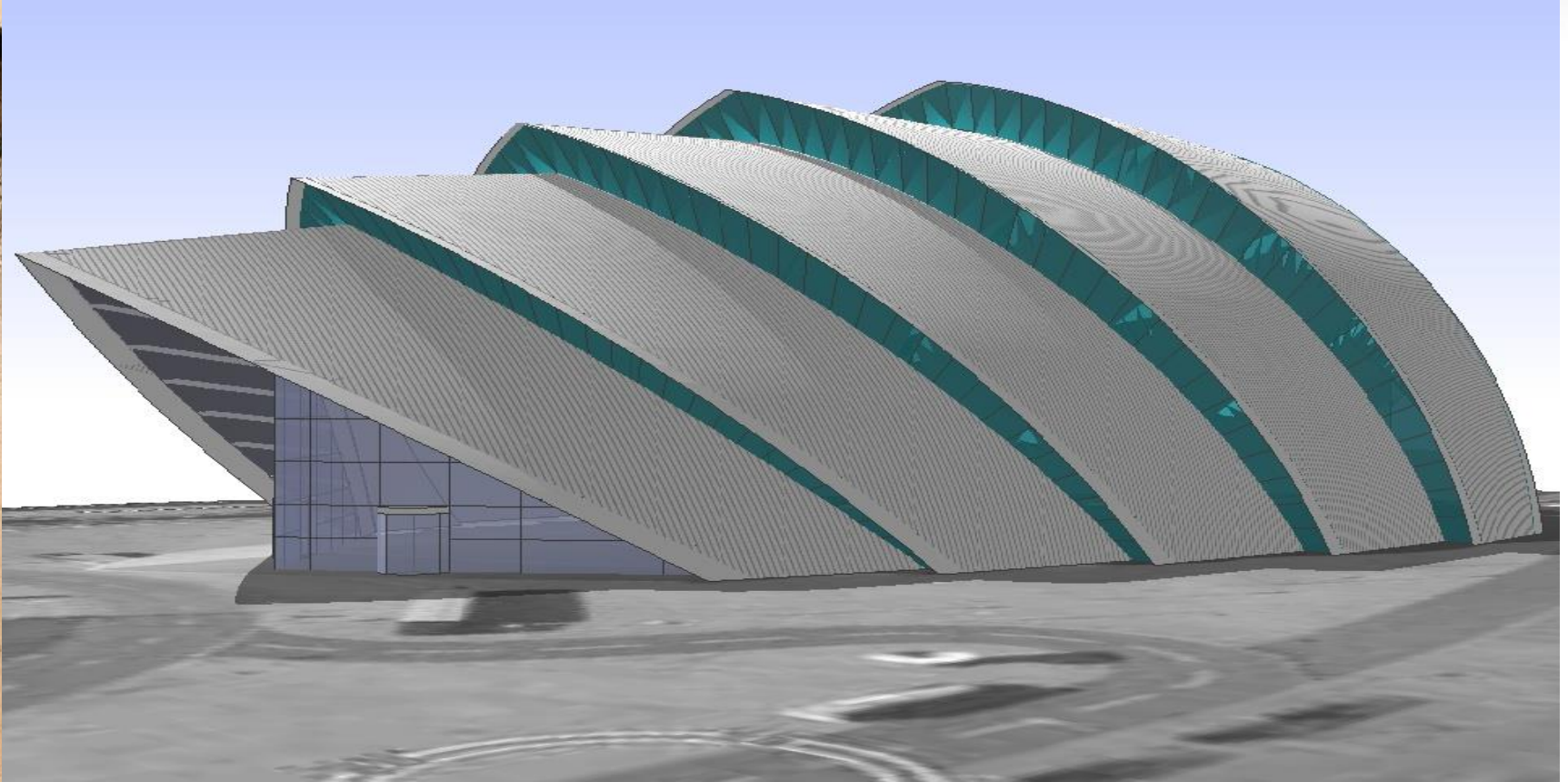
# Purwarupa (*Prototype*)



# Purwarupa (*Prototype*)



# Purwarupa (*Prototype*)



# Purwarupa (*Prototype*)



# Purwarupa (*Prototype*)

