

TRABAJO FINAL DE GRADO
APROXIMACIÓN ARQUITECTÓNICA
Y DISEÑO ESTRUCTURAL DEL
AEROPUERTO DE STANSTED DE
NORMAN FOSTER

AUTOR | MARC ARANDA MIRAGALL
TUTORES | ERNESTO JESÚS FENOLLOSA FORNER
LUÍS MARÍA DE MAZARREDO AZNAR

Universitat Politècnica de València (UPV)
Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de València
Grado en Fundamentos de la Arquitectura | 2016-2017
Departamento | Mecánica de medios continuos y teoría de estructuras



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



TRABAJO FINAL DE GRADO APROXIMACIÓN ARQUITECTÓNICA Y DISEÑO ESTRUCTURAL DEL AEROPUERTO DE STANSTED DE NORMAN FOSTER

AUTOR | MARC ARANDA MIRAGALL
TUTORES | ERNESTO JESÚS FENOLLOSA FORNER
LUÍS MARÍA DE MAZARREDO AZNAR

Universitat Politècnica de València (UPV)
Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de València
Grado en Fundamentos de la Arquitectura | 2016-2017
Departamento | Mecánica de medios continuos y teoría de estructuras



UNIVERSITAT
POLITÀCNICA
DE VALÈNCIA



00. ÍNDICE

01 | INTRODUCCIÓN

01.01 | RESUMEN-RESUM-ABSTRACT

01.01.01 | RESUMEN

01.01.02 | RESUM

01.01.03 | ABSTRACT

01.02 | OBJETIVOS

02 | NORMAN FOSTER

02.01 | BREVE BIOGRAFÍA DEL ARQUITECTO

02.02 | TRAYECTORIA PROFESIONAL

02.02.01 | ESTUDIOS EN ESTADOS UNIDOS (1961-1963)

02.02.02 | TEAM 4 (1963-1967)

02.02.03 | FOSTER ASSIOCATES (1967-1989)

02.02.04 | FOSTER + PARTNERS (1989-Actualidad)

02.03 | OBRAS DEL ARQUITECTO

02.03.01 | TEAM 4 (1963-1967)

02.03.02 | FOSTER ASSOCIATES (1967-1989)

02.03.03 | FOSTER + PARTNERS (1989-Actualidad)

02.04 | EJE CRONOLÓGICO

03 | EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO

03.01 | CONTEXTO HISTÓRICO

03.01.01 | EL AEROPUERTO DE STANSTED

03.01.02 | LAS GRANDES NAVES

03.02 | EMPLAZAMIENTO

03.03 | ENCARGO

03.04 | IDEA

03.05 | ORGANIZACIÓN

03.06 | SEPARACIÓN POR NIVELES

08

09

09

09

10

10

12

13

14

14

14

15

16

17

17

19

25

31

34

35

35

35

36

36

37

37

37

03.07 | FORMA Y VOLUMEN

03.07.01 | LOS ÁRBOLES ESTRUCTURALES

03.07.02 | LA CUBIERTA

03.08 | LA LUZ

03.09 | FLEXIBILIDAD

03.10 | RELACIÓN CON LA NATURALEZA

03.11 | DOCUMENTACIÓN GRÁFICA

03.11.01 | PLANTA CUBIERTA

03.11.02 | PLANTA COTA CERO

03.11.03 | PLANTA SÓTANO

03.11.04 | PLANTAS EDIFICIO SATÉLITE

03.11.05 | ALZADO CON PERSPECTIVA

03.11.06 | DETALLE DE LA SECCIÓN

03.12 | MATERIALIDAD Y CONSTRUCCIÓN

03.12.01 | ÁRBOLES ESTRUCTURALES

03.12.02 | CONTENEDORES DE SERVICIO

03.12.03 | LA CUBIERTA DEL VESTÍBULO

03.12.04 | LUCERNARIOS

03.12.05 | MURO CORTINA

03.12.06 | CERRAMIENTO DEL SÓTANO

03.12.07 | CABINAS DEL VESTÍBULO

03.12.08 | MOSTRADORES DE FACTURACIÓN

03.12.09 | ESTACIÓN DE FERROCARRIL

03.12.10 | EDIFICIO SATÉLITE

04 | LA ESTRUCTURA

04.01 | DESCRIPCIÓN GENERAL

04.02 | ÁRBOL ESTRUCTURAL

04.02.01 | ANÁLISIS DETALLADO

04.02.02 | MODELIZACIÓN

04.03 | EL FORJADO DEL VESTÍBULO

04.03.01 | ANÁLISIS DETALLADO

04.03.02 | MODELIZACIÓN

38

38

38

39

40

40

41

41

42

43

44

44

44

45

46

47

48

49

49

51

52

53

53

54

56

57

58

58

60

61

61

61

04.04 ASIGNACIÓN DE CARGAS	63
04.04.01 CARGAS PERMANENTES	63
04.04.02 CARGAS VARIABLES	64
04.05 COMBINACIONES DE CARGAS	67
04.05.01 COMBINACIONES ESTADO LÍMITE ÚLTIMO (ELU)	69
04.05.02 COMBINACIONES ESTADO LÍMITE DE SERVICIO (ELS)	69
05 ANÁLISIS DE RESULTADOS	72
05.01 DESCRIPCIÓN GENERAL	73
05.02 SOLICITACIONES Y DIMENSIONADO	73
05.02.01 ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA METÁLICA	73
05.02.02 ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN	78
05.03 DEFORMACIONES DEL MÓDULO BÁSICO	82
05.03.01 LA CUBIERTA	82
05.03.02 EL FORJADO	83
05.04 DEFORMACIONES DEL MODELO DE 9 MÓDULOS	84
05.04.01 LA CUBIERTA	84
05.04.02 EL FORJADO	86
06 CONCLUSIONES	88
07 BIBLIOGRAFÍA	92
08 ÍNDICE DE IMÁGENES	96

01. INTRODUCCIÓN

01.01 | RESUMEN-RESUM-ABSTRACT

01.01.01 | RESUMEN

La nueva terminal del Aeropuerto de Stansted, proyectada por Foster Associates en 1981, es considerada una de las mejores obras de Sir Norman Foster en la década de los ochenta. Dicha terminal, con un arquitecto apasionado de la aviación, se llevó a cabo con el pretexto de devolverle al transporte aéreo la emoción de la que gozaban sus pasajeros antes de subir al avión en los años veinte. De la misma manera, sentó las bases de cómo serían las terminales de las grandes estaciones de transporte venideras.

El esquema proyectual de la terminal es claro y completamente representativo de Sir Norman Foster: la separación por niveles de las distintas funciones que puedan desarrollarse en un edificio, la piel transparente que ofrece la relación directa del interior y exterior, la grandiosa importancia con la que mima a la estructura y por la cual Foster apuesta en cada proyecto por superarse en lo que a tecnología se refiere y por último la relación constante con la naturaleza y el entorno que Foster siempre trabaja con detalle.

El proyecto presenta una dualidad estructural y constructiva la cual, íntimamente ligada con la separación por niveles, da como resultado una estructura metálica formada por árboles estructurales que sustentan una cubierta de cúpulas trianguladas ligeras y una estructura de hormigón formada por el forjado reticular aligerado y los soportes de hormigón, las cuales trabajan independientemente entre ellas.

Tras el estudio del edificio se propone un modelo estructural simplificado para posteriormente conocer las solicitaciones y deformaciones del edificio mediante el análisis y el cálculo proporcionado por el software informático Architrave y pudiendo finalmente elaborar una serie de conclusiones verídicas y razonadas con las que determinar el dimensionamiento más adecuado para el conjunto de la estructura.

PALABRAS CLAVE | Aeropuerto de Stansted, Norman Foster, niveles por función, dualidad estructural y constructiva, árbol estructural.

01.01.02 | RESUM

La nova terminal de l'Aeroport de Stansted, projectada per Foster Associates en 1981, es considerada una de les millors obres de Sir Norman Foster en la dècada dels huitanta. Aquesta terminal, amb un arquitecte apassionat de l'aviació, es va dur a terme amb el pretext de retornar-li al transport aeri l'emoció de la que gaudien els passatgers abans de pujar al avió en els anys vint. De la mateixa manera, va establir les bases de com serien les terminals de les grans estacions de transport venidores.

L'esquema projectual de la terminal és clar i completament representatiu de Sir Norman Foster: la separació per nivells de les distintes funcions que puguen desenvolupar-se en un edifici, la pell transparent que oferix la relació directa de l'interior i l'exterior, la grandiosa importància amb la qual mima l'estructura y per la qual Foster aposta en cada projecte per superar-se en lo que a tecnologia es referix y per última la relació constant amb la natura i l'entorn que Foster sempre treballa amb detall.

El projecte presenta una dualitat estructural y constructiva la qual, íntimament lligada amb la separació per nivells, dóna com a resultat una estructura metàl·lica formada per arbres estructural que sustenten una coberta de cúpules triangulars lleugeres i una estructura de formigó formada pel forjat reticular alleugerat i els suports de formigó, les quals treballen independentment entre elles.

Després de l'estudi del edifici es proposa un model estructural simplificat per a posteriorment conèixer les sol·licitacions y les deformacions del edifici mitjançant l'anàlisi y el càlcul proporcionat pel software informàtic Architrave y podent finalment elaborar una sèrie de conclusions verídiques y raonades amb les que determinar el dimensionament més adequat per al conjunt de l'estructura.

PARAULES CLAU | Aeroport de Stansted, Norman Foster, nivells per funció, dualitat estructural y constructiva, arbre estructural.

01.01.03 | ABSTRACT

The new Stansted Airport terminal, designed by Foster Associates in 1981, is considered one of the Norman Foster's best projects in the eighties. This terminal, with a passionate aviation architect, was carried out under the pretext of returning to air transport the emotion enjoyed by its passengers before boarding the plane in the 1920s. In the same way, it laid the foundations of how would be the terminals of great transport stations to come.

The design of the terminal is clearly and completely representative of Sir Norman Foster: the separation by levels of the different functions that can be developed in a building, the transparent skin that offers the direct relation between the interior and the exterior, the great importance with which pamper to the structure and by which Foster bets on every project to be overcome in terms of technology and finally the constant relationship with nature and the environment that Foster always works in detail.

The project presents a structural and constructive duality which, intimately linked with the separation by levels, results in a metallic structure formed by structural trees than support a roof of light triangular domes and a concrete structure formed by the concrete waffle slab and de concrete pillars, which work independently between them.

After the study of the building a simplified structural model is proposed to later know the requests and deformations of the buildings through the analysis and calculation provided by the computer software called Architrave and can finally elaborate a series of veridical and reasoned conclusions with which to determine the most dimensioned suitable for the whole structure.

KEY WORDS | Stansted Airport, Norman Foster, nivells per funció, dualitat structural y constructive, structural tree.

01.02 | OBJETIVOS

El objeto del presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo principal la descripción del comportamiento de la estructura de la terminal del Aeropuerto de Stansted de Norman Foster a partir de los resultados obtenidos del análisis de un modelo informático. Sin embargo, se entiende importante conocer la vida y obra del arquitecto, su evolución con el paso de los años, así como establecer una aproximación arquitectónica, geométrica y constructiva del edificio.

Por lo tanto, los objetivos específicos del estudio serán los siguientes:

01 | Redactar una breve biografía en la que queden presentes sus estudios y etapas profesionales, desde el Team 4 hasta Foster + Partners.

02 | Recopilar datos de los proyectos más representativos que han sido desarrollados por Foster a lo largo de medio siglo de actividad profesional, mostrando como resumen un eje cronológico.

03 | Analizar los conceptos por los que la nueva terminal llega a ser una las mejores obras de la década de los ochenta: contexto histórico, idea, forma y volumen, el uso de la tecnología, la luz, la relación con el entorno, etc.

04 | Profundizar en la materialidad y construcción del proyecto, analizando con detalle los elementos que componen el edificio, reflexionando porqué se resuelven de la manera en la que Foster lo hace. Se incluye la descripción de los sistemas y elementos estructurales, así como su geometría.

05 | Elaborar un modelo estructural del edificio mediante el software informático Architrave partiendo de la simplificación del proyecto y llevando a cabo la asignación de cargas y sus diferentes combinaciones.

06 | Describir el análisis estructural a realizar, explicando el comportamiento global de la estructura y de todos sus elementos y comprobando el predimensionado de las barras

07 | Extraer unas conclusiones del análisis de los resultados obtenidos.



02. NORMAN FOSTER

02.01 | BREVE BIOGRAFÍA DEL ARQUITECTO

SIR NORMAN FOSTER

Norman Foster nace en Reddish, Stockport, el 1 de junio de 1935, en el seno de una familia trabajadora. Poco después de su nacimiento, su familia se traslada a Levenshulme, Manchester.

Hijo único de Robert y Lillian Foster, Foster estudia Arquitectura y Urbanismo en la Universidad de Manchester, entre el 1956 y 1961. Licenciado en 1961, es galardonado con la beca Henry (Henry Fellowship) mediante la cual accede a estudiar en la Universidad de Yale, New Heaven, USA, un Máster de Arquitectura, obteniendo el Master Degree de Arquitectura en 1962.

Norman Foster, Premio Pritzker en 1999 y Premio Príncipe de Asturias en 2009, ha sido en sus años de profesión vicepresidente de la Architectural Association, experto externo de la Royal Institute of British Architects, miembro del consejo del Royal Institute of Arts de Londres, del Royal Institute of British Architects, de la Society of Industrial Artists and Designers y Doctor Honoris Causa de la University of East Anglia, del Royal College of Arts de Londres, de la Universidad Politécnica de Madrid y de la Universitat Politècnica de València.

Norman Foster fue nombrado caballero en 1990 (Sir Norman Foster) y en 1999, la reina Isabel II le otorgó el título nobiliario vitalicio de Lord Foster of Thames Bank.

“Nunca me he creído importante como persona, sin embargo, siempre he pensado que la gente para la que trabajo o la gente que trabaja conmigo sí que es muy importante. (...)”

Norman Foster. Discurso de aceptación del premio Doctor Honoris Causa por la Universitat Politècnica de València. (4 de diciembre de 1992)

Norman Foster



02.02 | TRAYECTORIA PROFESIONAL

02.02.01 | ESTUDIOS EN ESTADOS UNIDOS (1961-1963)

Es en la Universidad de Yale, más concretamente en el estudio de Paul Rudolph, donde conoce a Richard Rogers, uno de sus futuros socios, de orígenes y estudios antagónicos, pero siendo complementarios y estimulantes el uno para el otro.

Mientras que Foster descendía de una familia modesta inglesa y su enseñanza se había basado en desarrollar proyectos en los plazos establecidos y con una gran biblioteca de detalles constructivos, Rogers era miembro de una familia italiana de orígenes británicos, acomodada y cosmopolita y sus estudios en la Architectural Association School of Architecture de Londres le habían otorgado el gusto por lo intelectual, sin dotarlo de habilidades gráficas ni disciplinas en lo referente a la elaboración de un proyecto.



Imagen 02.02. Norman Foster, Richard Rogers y Carl Abbott en Yale (1962)

Conoce también a James Stirling, el cual trabajó un breve período de tiempo en Yale, así como la actualidad americana, diferenciada en gran parte de lo que sucedía en Inglaterra, y las obras de Wright y Mies entre otros.

02.02.02 | TEAM 4 (1963-1967)

Al regreso a su Inglaterra natal, Foster funda junto con Richard Rogers, Georgie Cheesman y la hermana de ésta, Wendy, un estudio de arquitectura llamado "Team 4". Días después Georgie decide abandonar el grupo y es reemplazada por Su Brumwell. Esto supone un comienzo difícil pues Georgie era la única con licencia de ejercicio profesional y Norman Foster no veía con buenos ojos a Wendy, pues parecía que se oponía a su creatividad.

Su reputación se consolidó mediante proyectos de viviendas y edificios industriales que le fueron encargados al estudio.

En el terreno sentimental, Norman Foster se casó con Wendy Cheesman el 1964 y tuvieron dos hijos, mientras que Richard Rogers se casó con Su.

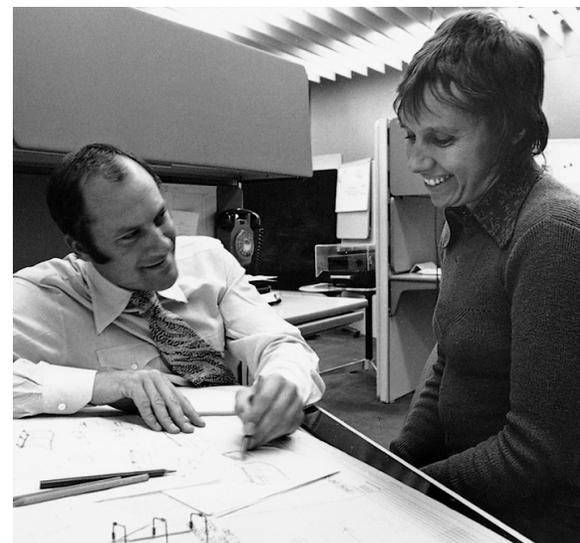


Imagen 02.03. Norman Foster y su esposa Wendy



Imagen 02.04. Richard Rogers y Su Brumwell

Sin embargo, el fin del Team 4 se produce en junio de 1967, cuando Foster y Rogers deciden cerrar el estudio debido en parte por las diferencias insalvables entre los dos matrimonios y porque aunque obtuvieron un premio por la fábrica Reliance en 1966, los encargos no aumentaron.

02.02.03 | FOSTER ASSOCIATES (1967-1989)

Norman y Wendy Foster fundan Foster Associates en 1967, enfocando sus proyectos hacia lo industrial y lo terciario, mientras que Rogers, en los años siguientes, encamina su proyección hacia casas de acero.

Es en este periodo de tiempo en el que Foster se centra en el programa y sus necesidades y abandona la idea de una estructura oculta por una piel envolvente.

Cabe destacar que desde el 1968 hasta el 1983 trabajan junto a Buckminster Fuller en algunos de sus proyectos.

02.02.03.01 | La década de los 70

Durante los años setenta, Foster demuestra, gracias a la Willis Faber & Dumas [imagen 02.05], su madurez y su conocimiento en el sector del trabajo, proyectando diferentes edificios públicos.

De esta manera, aparecen los proyectos de estructuras ligeras y de grandes luces que dan como resultado una de las características más destacables del Foster de los setenta: los grandes contenedores, los espacios interiores libres de estructura.



Imagen 02.05. Willis Faber & Dumas (1971-75)

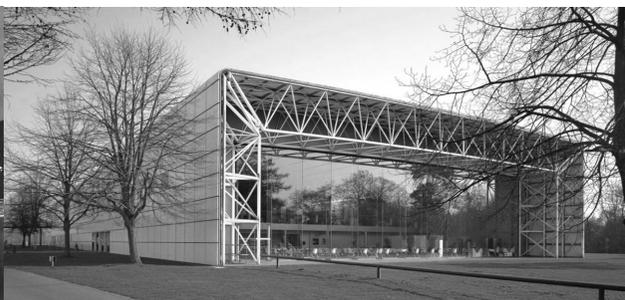


Imagen 02.06. Sainsbury Centre for Visual Arts (1974-78)

Así, edificios públicos como el Sainsbury Centre for Visual Arts (1974-1978) [imagen 02.06] y proyectos no construidos como el Hammersmith Centre y el estadio de Frankfurt dan cuenta de las ideas innovadoras de Foster en la época, ideas que se convierten en uno de los puntos cumbre de su obra.

02.02.03.02 | La década de los 80

Supone para Foster la oportunidad de dar luz a proyectos de mayor envergadura, desarrollando su posición sobre los aspectos urbanos pertinentes así como la relación del proyecto arquitectónico con la ciudad. Es la época en la que proyecta algunos de sus mayores logros, incluyendo el Hong Kong & Shanghai Bank Headquarters (1979-1986) [imagen 02.07], considerado por muchos como su obra maestra.

Durante estos años, Foster abandona la ambigüedad entre racionalismo y organicismo, influenciados por Mies Van der Rohe, que sí que aparecía en sus construcciones anteriores, para mostrar un organicismo dado ya por Frank Lloyd Wright, el cual, con analogías biológicas, está íntimamente ligado con la ingeniería. Esto se puede observar nítidamente en el Aeropuerto de Stansted (1981-1991)[imagen 02.09].

Es el período de tiempo en el que se le relaciona con el movimiento "High-Tech", junto con Richard Rogers y Michael Hopkins principalmente, aunque distaba de ellos en la idea de que los elementos tecnológicos, como la estructura y las instalaciones, eran el fundamento de expresión de la arquitectura.



Imagen 02.07. HSBC (1979-86)



Imagen 02.08. Centro Renault (1980-82)



Imagen 02.09. Stansted Airport (1981-91)

Sin embargo, esta actitud cambia radicalmente con el Centro de Distribución Renault en Swindon, Wiltshire (1980-1982) [imagen 02.08].

02.02.04 | FOSTER + PARTNERS (1989-Actualidad)

02.02.04.01 | La década de los 90

Wendy Foster muere víctima de un cáncer el 1989, momento en el que el estudio pasa a llamarse Foster + Partners. Durante los años noventa, sigue las premisas que había desarrollado en la década anterior y el número de proyectos que se le encargan y los concursos que gana no para de aumentar.

El estudio arranca de una manera más contundente la carrera por una arquitectura sostenible, priorizando la ventilación y la iluminación naturales, orientando cada proyecto para resguardarse de la radiación directa del Sol en los espacios de trabajos. Así mismo, se enfoca la utilización de recursos naturales para la generación de energía mediante sistemas eólicos y fotovoltaicos.

El gran hito de esta década para el estudio es el proyecto del nuevo Reichstag Alemán (1992-1999) [imagen 02.10], de gran simbolismo para el pueblo germano. De la misma manera, el trabajo en obras de ingeniería civil como el Viaducto de Millau (1993-2004) [imagen 02.11] o el Millennium Bridge (1996-2000) demuestran la gran capacidad del estudio para desarrollar todo lo que se le presenta.



Imagen 02.10. Reichstag (1992-99)

Imagen 02.11. Viaducto Millau (1993-2004)

Imagen 02.12. Torre Collserola (1998-2002)

Imagen 02.13. London Town Hall (1998-2002)

Imagen 02.14. Hearst Tower (2000-06)

Imagen 02.15. Mascar City (2007-08)

Aparecen sus primeras construcciones en territorio español, como lo son la Torre Collserola en Barcelona (1988-1992) [imagen 02.12], el Metro de Bilbao (1988-1995), el Palacio de Congresos de Valencia (1993-1998) o las estaciones de servicio Repsol (1997).

02.02.04.02 | Actualidad

Foster + Partners se ha convertido en unos de los estudios de arquitectura y diseño más innovadores del mundo después de más de cinco décadas al servicio de la sociedad.

El estudio ha abanderado el enfoque sostenible de la arquitectura mediante la amplia variedad de proyectos que engloba desde planes maestros urbanísticos hasta infraestructuras públicas, aeropuertos, edificios civiles y culturales, oficinas, espacios de trabajo, viviendas y diseño industrial.

Así, con cuarenta años de trabajo, Norman Foster ha cedido protagonismo a sus socios principales, disminuyendo su ritmo de trabajo, aunque no parando por completo su actividad.

El estudio cuenta con sede en Londres y oficinas alrededor de todo el mundo: en Nueva York, Madrid, Hong Kong y Abu Dhabi; con una plantilla de unos 1200 trabajadores y una magnífica reputación internacional conseguida mediante un gran y constante esfuerzo de superación, con edificios contruidos en más de treinta países de los seis continentes.

Cabe destacar que los proyectos del estudio, desde su origen, presenten una imagen rotunda y clara, con una precisión exquisita en su organización funcional y estructural, con una gran calidad constructiva y de acabados, siguiendo las claves del rendimiento energético.

02.03 | OBRAS DEL ARQUITECTO

02.03.01 | TEAM 4 (1963-1967)

1963 | COCKPIT | PILL CREEK, CORNWALL, UK

Primer encargo del Team 4 consistente en un refugio semienterrado en el suelo a las orillas del río Fal, lo que presenta uno de los ítems de la arquitectura fosteriana: la relación entre la arquitectura y la naturaleza.

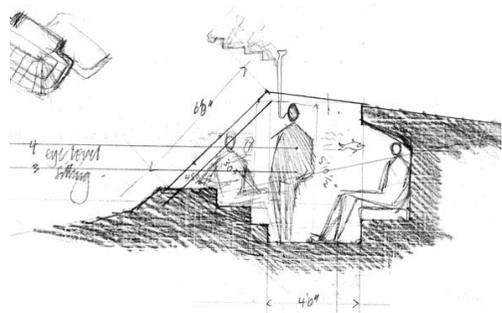


Imagen 02.16. Boceto

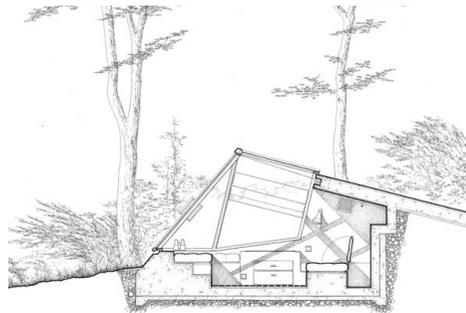


Imagen 02.17. Sección transversal



Imagen 02.18. Vista exterior

1964-1966 | CREEK VEAN HOUSE | FEOCK, CORNWALL, UK

Proyecto para la residencia de los suegros de Rogers, los Brumwell. Vivienda de muros de hormigón y luz cenital para un coleccionista de arte cuya organización distributiva y arquitectónica es primordial y donde el sistema de plantas superpuestas y desplazadas dan lugar a las vistas hacia el río Fal.

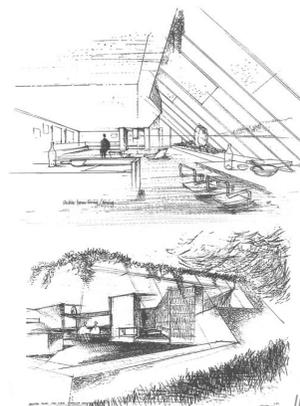


Imagen 02.19. Bocetos

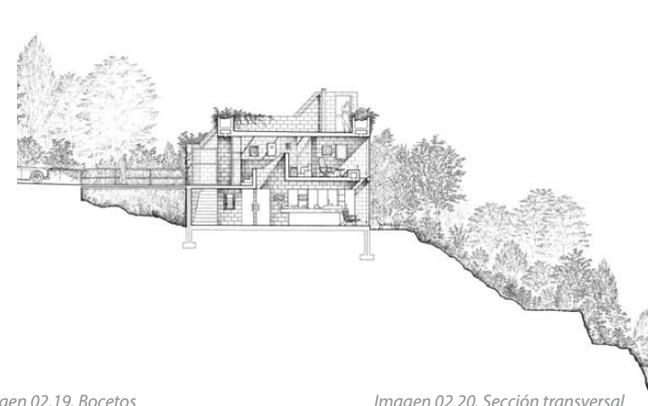


Imagen 02.20. Sección transversal



Imagen 02.21. Vista exterior



Imagen 02.22. Vista interior



Imagen 02.23. Lucernarios

1965-1966 | JAFFE HOUSE (SKYBREAK HOUSE) | RADLETT, HERTFORDSHIRE, UK

Este edificio industrial es el último proyecto del Team 4. Supone un cambio radical respecto a sus proyectos anteriores. Se realiza una estructura casi miesiana, metálica y ligera, con un rasgo característico de los proyectos posteriores: los tirantes metálicos vistos.

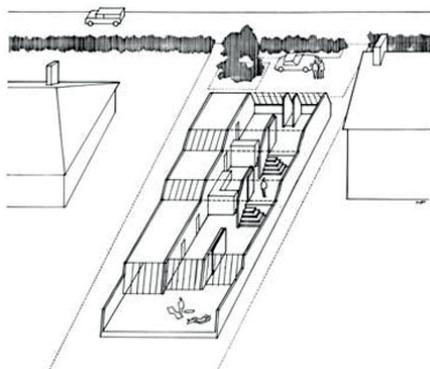


Imagen 02.24. Sección axonométrica

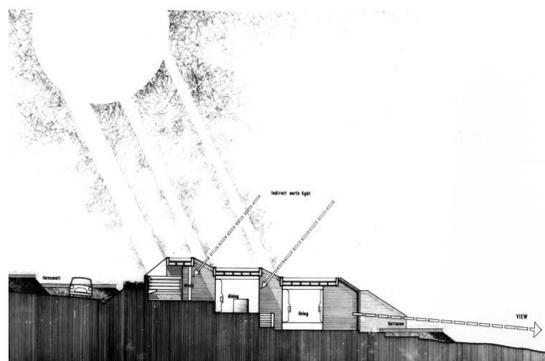


Imagen 02.25. Sección transversal



Imagen 02.26. Lucernarios



Imagen 02.27. Vista interior

1967 | RELIANCE CONTROLS | SWINDON, WILTSHIRE, UK

Presenta la madurez del estudio, pasando del romanticismo wrightiano desarrollado anteriormente a una geometría racionalista, dotando la distinción entre espacios servidos y sirvientes como lo haría Louis Khan y se da forma a una geometría clara a lo Stirling.

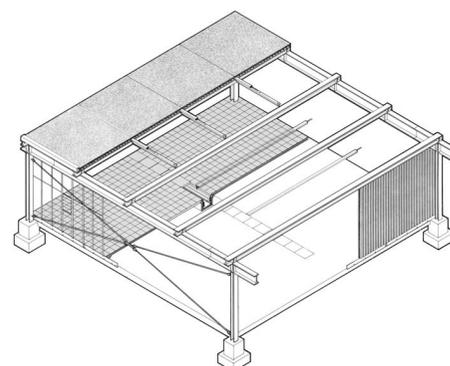


Imagen 02.28. Esquema estructural y constructivo



Imagen 02.29. Vista interior



Imagen 02.30. Detalle del revestimiento metálico y de las riostras

02.03.02 | FOSTER ASSOCIATES (1967-1989)

1967-1969 | CENTRO RECREATIVO Y TERMINAL DE PASAJEROS PARA LA FRED OLSEN LINE | LONDON, UK

Período de relación con la Fred Olsen Line. De gran importancia pues trabaja la que será una característica fundamental de su arquitectura, la separación funcional por niveles. En el centro recreativo, la planta inferior alberga el espacio de recreo mientras que en la superior ubica el centro de dirección y control del tráfico.

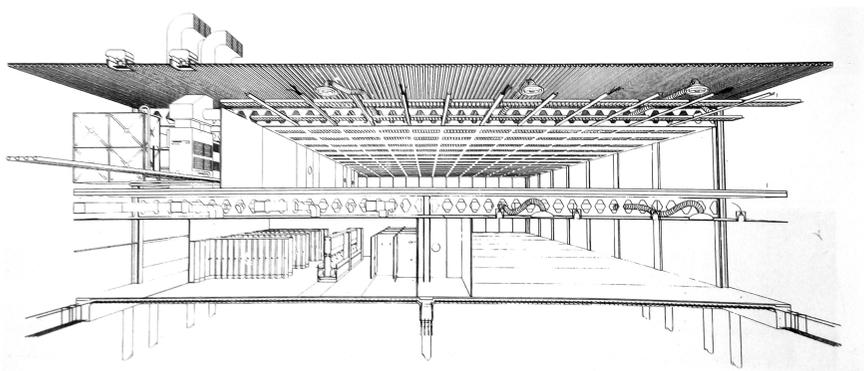


Imagen 02.31. Sección en perspectiva. Centro de recreación

En la terminal, el original túnel se sobreeleva para el paso de pasajeros, dejando totalmente libre el espacio inferior para el transporte de mercancías (como veremos en el Aeropuerto de Stansted). De la misma manera, sigue desarrollando el uso del acero y el estudio del cerramiento.

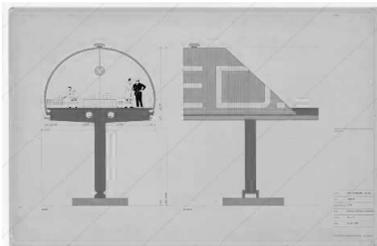


Imagen 02.32. Sección y detalle del frente



Imagen 02.34. Vista interior del túnel



Imagen 02.33. Vista exterior

1970-1971 | SEDE DE LA IBM | COSHAM, HAMPSHIRE, UK

De superficie rectangular y en una sola planta, Foster sigue avanzando en las claves de su obra: estructura metálica ligera con núcleos de servicios fijos, dando flexibilidad al proyecto, el uso de la malla modular y un cerramiento de vidrio reflectante que supone la mimetización con la naturaleza.

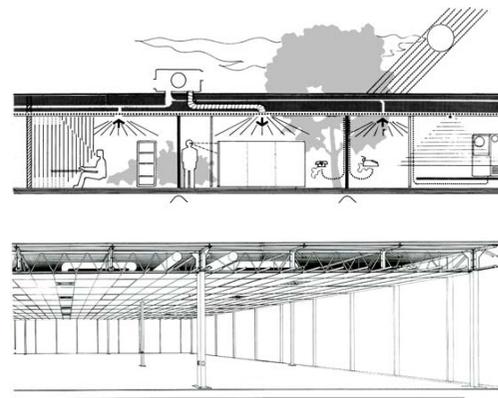


Imagen 02.35. Croquis y sección con perspectiva



Imagen 02.36. Mimetización con la naturaleza



Imagen 02.37. Vista interior

1971-1975 | SEDE DE WILLIS FABER & DUMAS | IPSWICH, SUFFOLK, UK

Mantiene el sistema de retícula, adaptándose al solar, así como la ubicación de la maquinaria en la planta inferior (a cota de calle) mientras que en las plantas superiores dispone a los usuarios y la cubierta-jardín. El cerramiento sigue siendo de vidrio reflectante, el cual deja ver el interior por la noche.

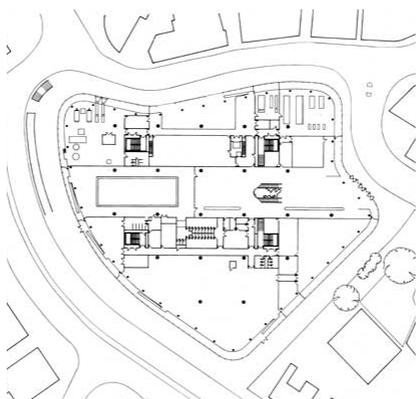


Imagen 02.38. Planta y emplazamiento



Imagen 02.39. Cubierta-jardín



Imagen 02.40. Vista exterior nocturna

1974-1978 | SAINSBURY CENTRE FOR VISUAL ARTS | NORWICH, NORFOLK, UK

Contenedor para albergar la colección de arte Sainsbury formado por 37 pórticos de vigas y pilares reticulares en los que se albergan la totalidad de las instalaciones, dando lugar a 35 metros de luz libre en el que la relación con el paisaje se desarrolla mediante dos testeros de láminas de vidrio.

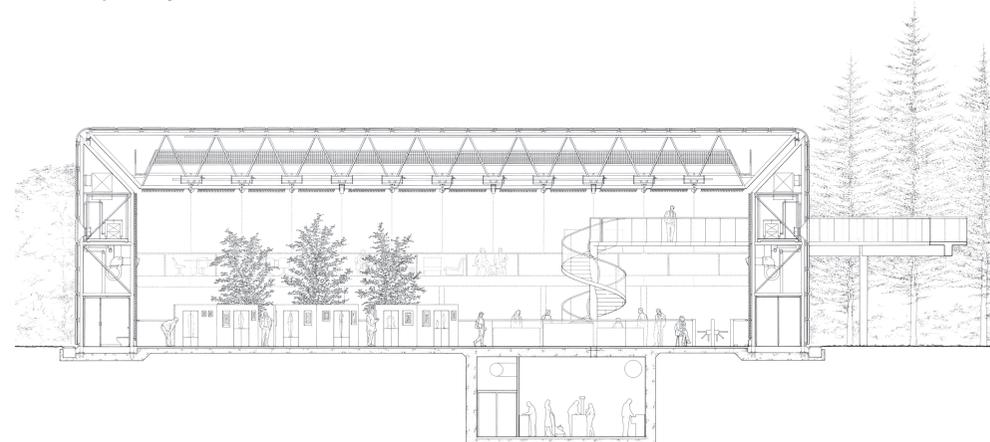


Imagen 02.41. Sección Transversal

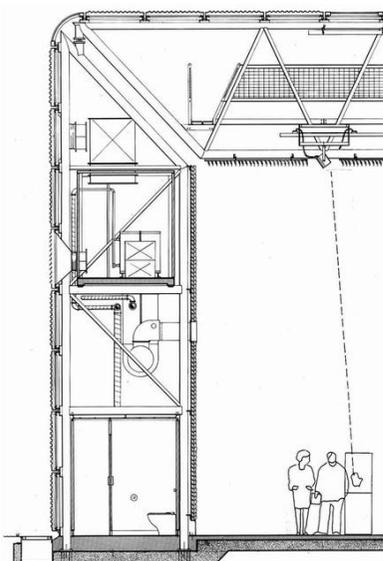


Imagen 02.42. Detalle instalaciones

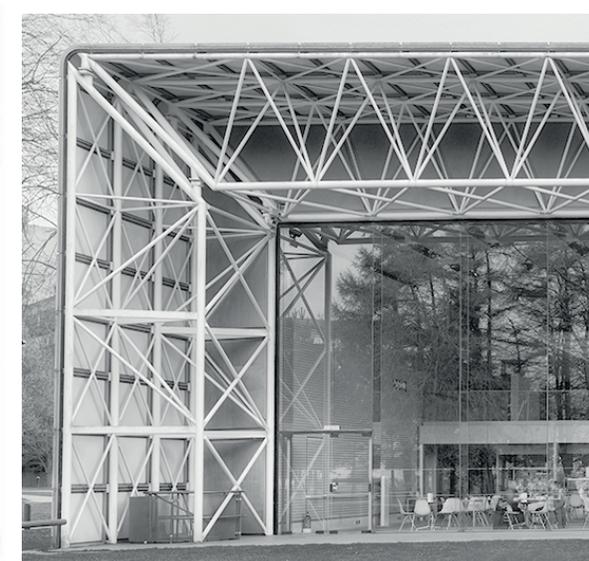


Imagen 02.43. Detalle fachada

1979-1986 | HONG KONG & SHANGHAI BANK HQ | HONG KONG, CHINA

Definido por muchos como su gran obra maestra. La estructura tiene protagonismo propio pues se traslada al exterior del edificio, en el cual se observan los tirantes que sustentan los diferentes grupos de plantas, conectados entre ellos mediante un nivel de doble altura en el que se organizan los espacios comunes. El edificio se relaciona con el entorno mediante una planta libre. Es el claro ejemplo de que la arquitectura, la tecnología y la naturaleza del lugar pueden fusionarse de una manera exquisita.



Imagen 02.44. Boceto inicial



Imagen 02.45. Detalle de la estructura en fachada



Imagen 02.46. Vista interior



Imagen 02.47. Vista exterior

1980-1982 | SEDE DE DISTRIBUCIÓN DE RENAULT | SWINDON, WILTSHIRE, UK

Constituido como un bosque de cables amarillos en mitad de la verde campiña inglesa (relación con la naturaleza), la malla cuadrada estructurada mediante mástiles, vigas perforadas y tirantes pintados vuelve a ofrecer la flexibilidad de ampliación o modificación a la que Foster acostumbra.

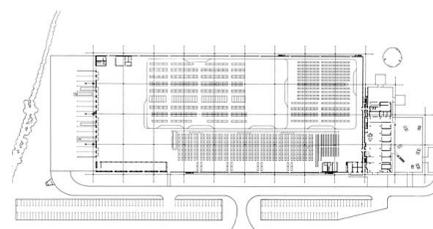


Imagen 02.48. Planta modulada



Imagen 02.49. Sección

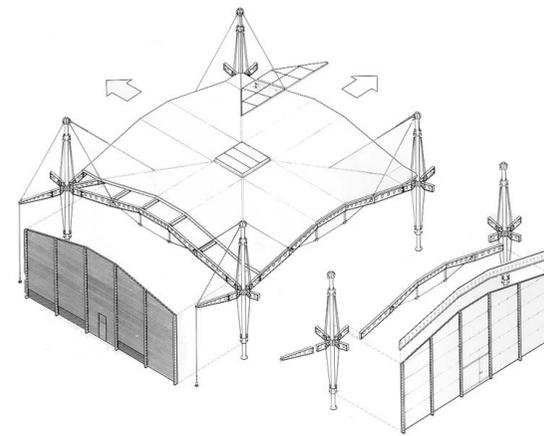


Imagen 02.50. Detalle del módulo estructural



Imagen 02.51. Vista exterior

1981-1991 | AEROPUERTO DE STANSTED | ESSEX, UK

Aeropuerto en el que vuelve a proyectar partiendo de la base de separar por niveles las funciones. Mientras que en la planta superior se encuentran los viajeros, en la planta inferior se encuentran las instalaciones del edificio. Utiliza el sistema de modulación proyectado con anterioridad, así como el uso de una piel transparente y una estructura que alberga en su interior los elementos fijos de instalaciones.

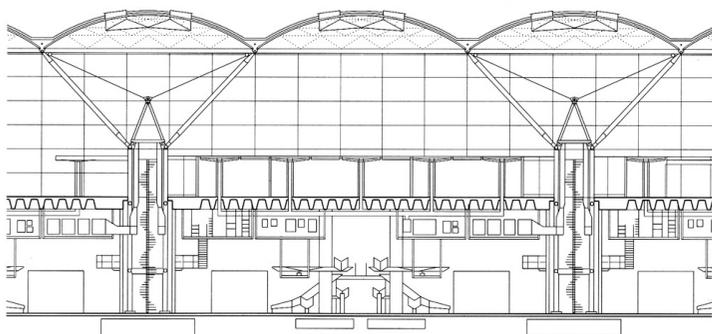


Imagen 02.52. Sección

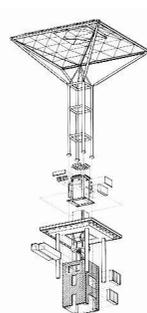


Imagen 02.53. Módulo estructural



Imagen 02.54. Vista interior

1982-1985 | BBC RADIO CENTRE | LONDON, UK

Se le presenta a Foster la problemática de un tejido urbano fuertemente consolidado y de gran carácter monumental. Respecto a Regent Street, la malla estructural ortogonal es definida mediante una rotación de 30°, mostrándose ante esta calle un edificio con una galería acristalada pública.

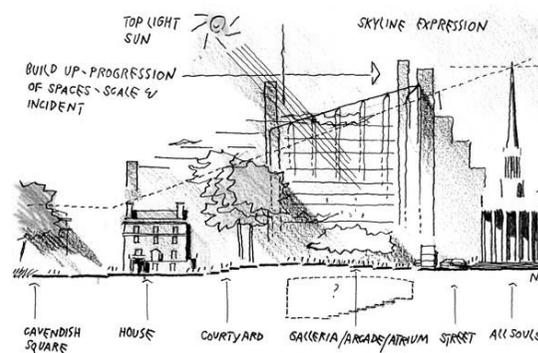


Imagen 02.55. Boceto del entorno

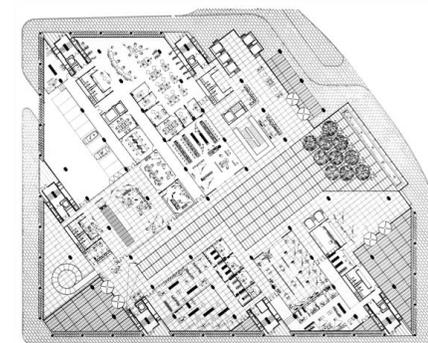


Imagen 02.56. Planta



Imagen 02.57. Vista maqueta exterior frente a la iglesia All Souls

1984-1993 | CARRÉ D'ART – MÉDIATHÈQUE OF NÎMES | NÎMES, FRANCE

Como en el edificio de la BBC, Foster debe volver a integrar un proyecto en un entorno histórico fuertemente consolidado. Decide trabajar los sótanos en el programa para así no superar la altura de ningún edificio adyacente. Mediante el vidrio consigue trabajar el proyecto a través de la luz natural.

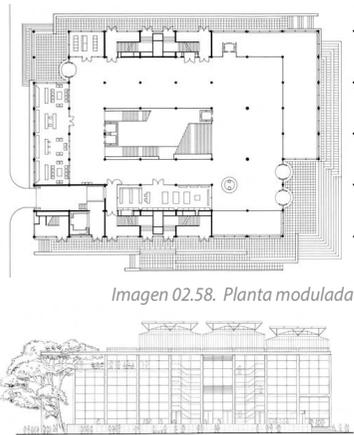


Imagen 02.58. Planta modulada



Imagen 02.60. Vista exterior del espacio público



Imagen 02.61. Relación con la Maison Carrée

1985-1991 | SACKLER GALLERIES, ROYAL ACADEMY OF ARTS | LONDON, UK

Ejemplo del respeto que tiene Foster por lo preexistente, proyectando una arquitectura inofensiva mediante el desarrollo del ascensor y la escalera en el patio de las galerías para mejorar los recorridos y devolverle la vida a la fachada ocultada durante 100 años utilizando únicamente vidrio y metal.

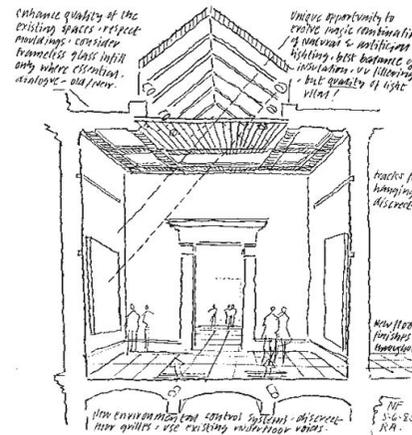


Imagen 02.62. Boceto



Imagen 02.63. Relación entre nuevo y preexistencia



Imagen 02.64. Ascensor



Imagen 02.65. Escalera

1987-1991 | CENTURY TOWER | TOKIO, JAPAN

El segundo rascacielos de Foster, después del HSBC, con el que comparte muchos aspectos referentes a la funcionalidad y a su forma. Mantiene el carácter de flexibilidad de las plantas, disponiendo la estructura en dos de sus caras mientras que en las otras dos ubica las instalaciones.



Imagen 02.66. Vista exterior

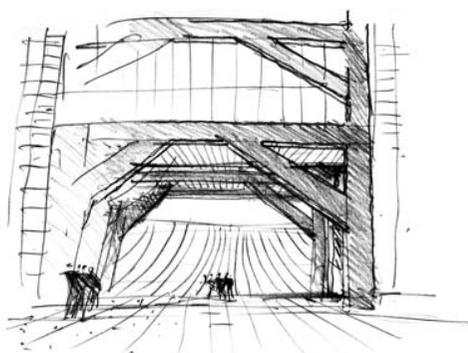


Imagen 02.67. Boceto de la estructura en fachada



Imagen 02.68. Vista interior

1988-1991 | CRESCENT WING, SAINSBURY CENTRE | NORWICH, NORFOLK, UK

Ampliación del Sainsbury Centre. Se realiza en el sótano pues el edificio se había pretendido abierto en los dos extremos y era contemplado como algo finito. Alberga oficinas, talleres y más salas de exposición. Se presenta como una media luna vítrea que emerge en la pendiente del terreno.

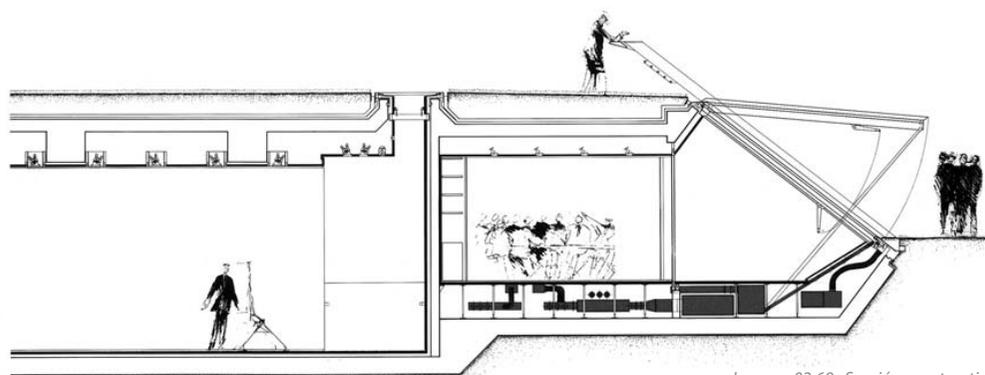


Imagen 02.69. Sección constructiva



Imagen 02.70. Vista exterior

02.03.03 | FOSTER + PARTNERS (1989-ACTUALIDAD)

1991-1997 | COMMERZBANK HEADQUARTERS | FRANKFURT, GERMANY

El primer rascacielos ecológico del mundo y el edificio más alto de Europa. Apuesta por los sistemas de iluminación y ventilación naturales, dando como resultado que el consumo energético es la mitad que en una torre de oficinas convencional. Mantiene el esquema de grupos de plantas.

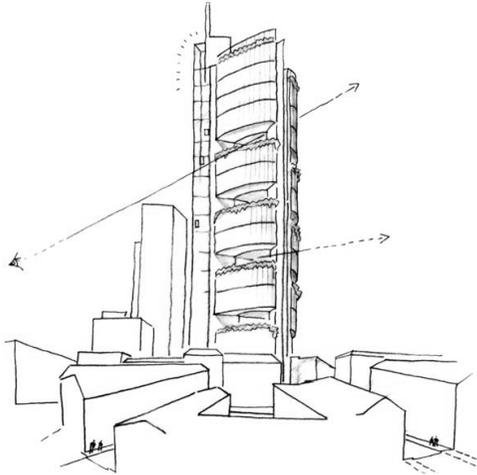


Imagen 02.71. Boceto de relación con el exterior



Imagen 02.73. Vista exterior



Imagen 02.72. Planta

1992-1994 | NUEVO REICHSTAG ALEMÁN | BERLIN, GERMANY

El proyecto parte de 4 premisas: el Bundestag como foro democrático, la historia del pueblo alemán, la accesibilidad del público y un programa ambiental. Dañado por la SGM, se siguen los pasos de la estructura original. La cúpula genera un espacio diáfano y da luz y ventilación natural.

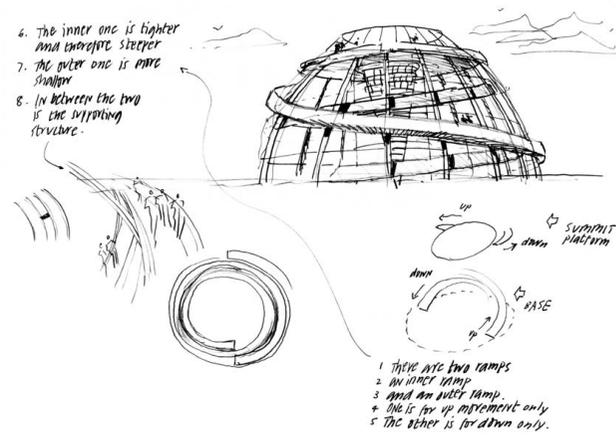


Imagen 02.74. Boceto



Imagen 02.75. Detalle de la cúpula



Imagen 02.76. Vista exterior

1993-2004 | VIADUCTO MILLAU | DESFILADERO DEL TARN, FRANCE

Viaducto proyectado junto con ingenieros estructurales. Consiste en mostrar la relación entre funcionalidad, tecnología y estética mediante una forma estructural frágil. La forma abierta de las columnas minimiza el perfil en el alzado. Representa una intervención mínima en el paisaje.

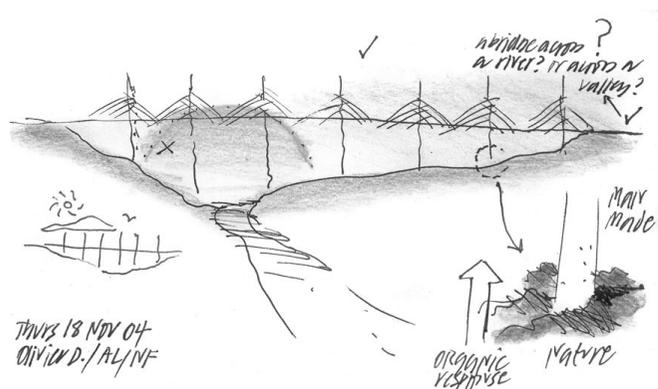


Imagen 02.77. Boceto

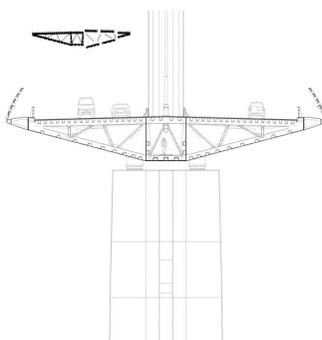


Imagen 02.78. Detalle constructivo



Imagen 02.79. Vista panorámica

1994-2000 | GREAT COURT AT BRITISH MUSEUM | LONDON, UK

Foster trata de manera cuidadosa las estructuras históricas y aprovecha el conocimiento de sus trabajos en interiores y exteriores. El interés del proyecto radica en la restauración de los elementos preexistentes y en la construcción cuidadosa de los espacios con materiales compatibles.

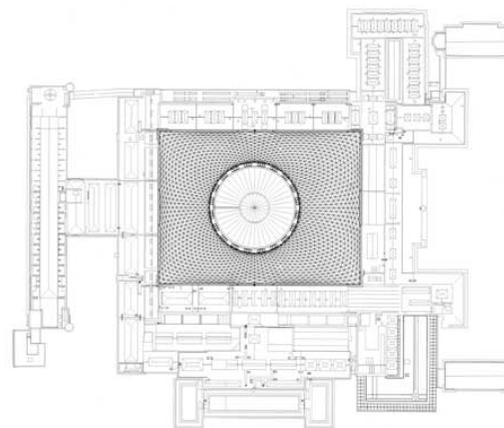


Imagen 02.80. Planta



Imagen 02.81. Detalle de la cubierta



Imagen 02.82. Espacio interior

1995-1997 | SECC CONFERENCE CENTRE | GLASGOW, UK

Espacio multifuncional proyectado para ser completamente flexible según sus necesidades, resuelto interiormente de una manera neutra, dotando al exterior de una imagen característica mediante un revestimiento de aluminio que se ilumina por la noche.

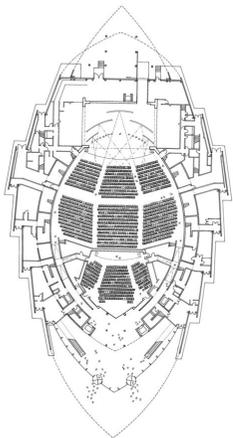


Imagen 02.83. Planta



Imagen 02.84. Sala de conferencias



Imagen 02.85. Vista exterior

1996-2000 | MILLENNIUM BRIDGE | LONDON, UK

Muestra de la capacidad de Foster de desarrollar proyectos de ingeniería civil. Completamente peatonal, la vista del entorno es continua en todo su recorrido. Por sus modificaciones debido a problemas de movimientos, supuso un cambio en la construcción de puentes de todo el mundo.

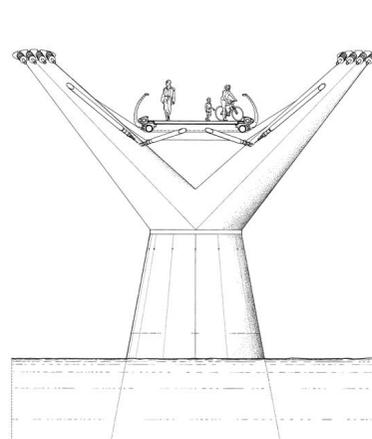


Imagen 02.86. Sección transversal | Soporte



Imagen 02.87. Detalle de la estructura



Imagen 02.88. Vista del Río Támesis

1997-2004 | 30 ST MARY AXE (SWISS RE) | LONDON, UK

El primer rascacielos ecológico de Londres. Su forma circular permite respetar las limitaciones del entorno, pareciendo más esbelto, reducir la desviación del viento, accionar el sistema de ventilación natural, provocar la renovación del aire y disminuir el uso de los sistemas de climatización.

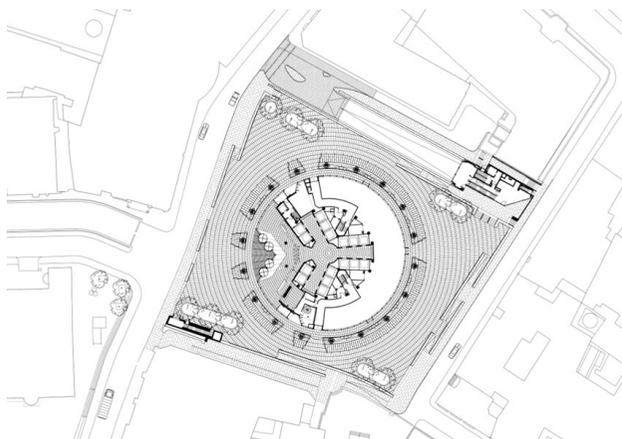


Imagen 02.89. Planta

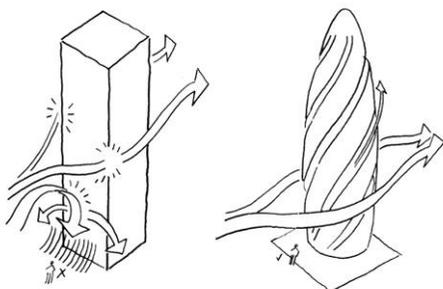


Imagen 02.90. Esquema desviación del viento



Imagen 02.91. Detalle del sistema de aberturas para la ventilación natural



Imagen 02.92. Vista exterior

1998-2002 | AYUNTAMIENTO DE LONDRES | LONDON, UK

La importancia del proyecto radica en su forma mediante la que se consigue un rendimiento energético óptimo, reduciendo la superficie expuesta a la luz solar directa, una ventilación natural de las oficinas, la energía proveniente de paneles fotovoltaicos y una refrigeración por agua subterránea.

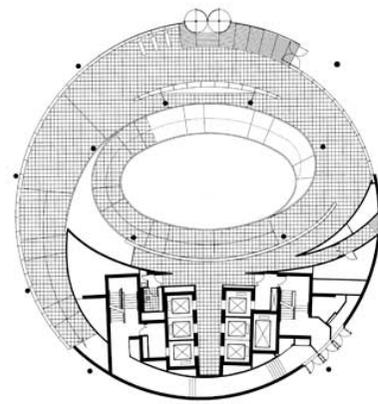


Imagen 02.93. Planta



Imagen 02.94. Espacio interior



Imagen 02.95. Vista exterior

2000-2006 | HEARST TOWER | NEW YORK, USA

El desafío consistía en establecer el diálogo entre la nueva torre y el edificio preexistente. Mantiene sus principios de sostenibilidad mediante la estructura de rejilla triangular, con la que utiliza un 20% menos de acero, siendo el 85% acero estructural reciclado y consumiendo un 25% menos de energía.



Imagen 02.96. Vista exterior

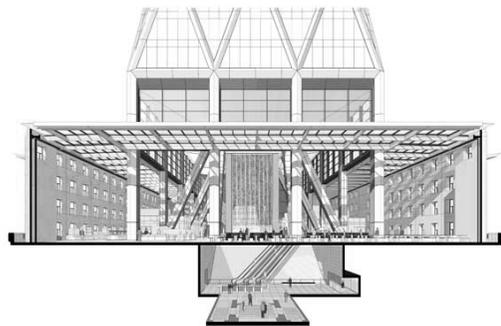


Imagen 02.97. Sección con perspectiva



Imagen 02.98. Vista interior | Estructura

2002-2009 | TORRE CAJA MADRID (TORRE CEPESA) | MADRID, ESPAÑA

La torre se plantea con conceptos ya desarrollados en torres anteriores. La ubicación de los servicios en la estructura del arco plantea la flexibilidad total de los espacios como ocurría en el HSBC. Se trabaja la ventilación natural y la orientación N-S para el aprovechamiento de la máxima sombra.

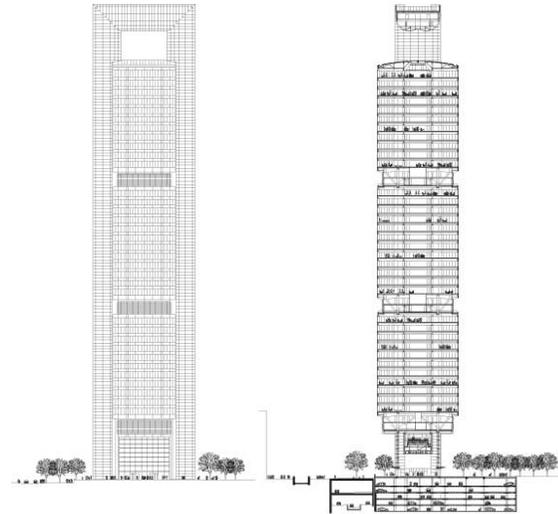


Imagen 02.99. Alzado

Imagen 02.100. Sección

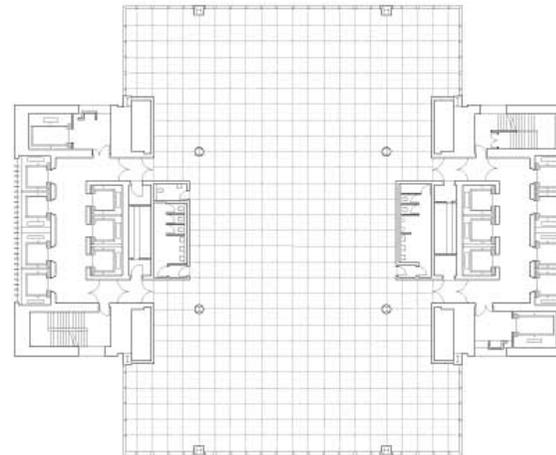


Imagen 02.101. Planta | Flexibilidad de los espacios por los servicios e instalaciones en el arco

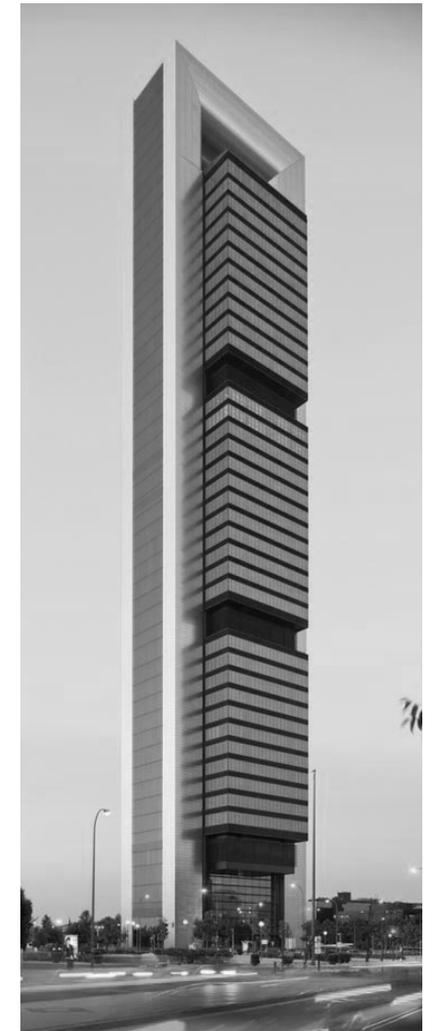


Imagen 02.102. Vista exterior

2003-2008 | BEIJING AIRPORT | BEIJING, CHINA

Es uno de los edificios más sostenibles del mundo. Incorpora un gran número de elementos pasivos del entorno como los lucernarios y un sistema integrado de aprovechamiento de recursos que provoca una reducción al mínimo del consumo energético.

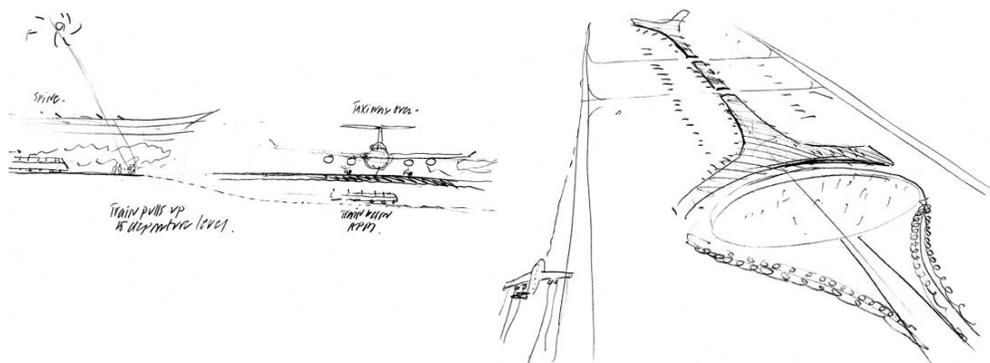


Imagen 02.103. Bocetos

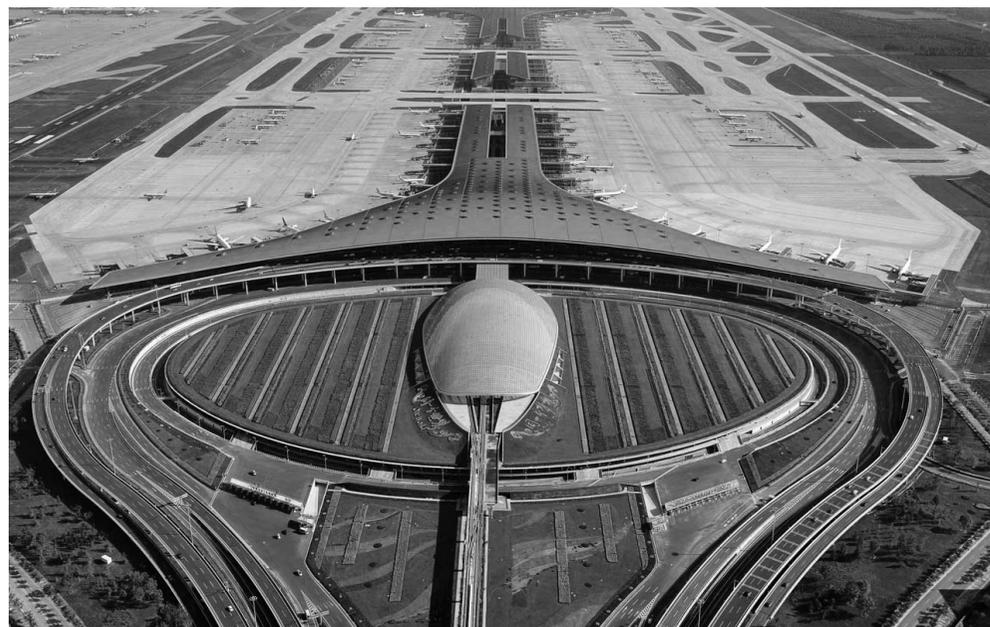


Imagen 02.104. Vista aérea

2007-2008 | MASDAR CITY | ABU DHABI, UNITED ARAB EMIRATES

Proyecto basado en la investigación de soluciones de energías renovables, con emisión cero de carbono y sin generación de residuos. Se plantea como una ciudad sin vehículos propulsados por combustibles fósiles. Su energía será producida por parques eólicos y fotovoltaicos.



Imágenes 02.105-02.108. Renderizados



Imagen 02.109. Vista aérea

02.04 | EJE CRONOLÓGICO - VIDA.OBRA.RECONOCIMIENTOS

1935 | Foster nace en Reddish, Stockport

1956-61 | Estudios de Arquitectura | Manchester

1961 | Beca Henry

1962 | Master Degree de Arquitectura | Yale

1963 | TEAM 4

1963 | Cockpit

1964-1966 | Creek Veau House

1965-1966 | Jaffe House (Skybreak House)

1967 | FOSTER ASSOCIATES

1967-1969 | Fred Olsen Line

1967 | Reliance Controls

1970-1971 | Sede de la IBM

1971-1975 | Sede de Willis Faber & Dumas

1974-1978 | Sainsbury Centre of Visual Arts

1979-1986 | Hong Kong & Shanghai Bank Headquarters

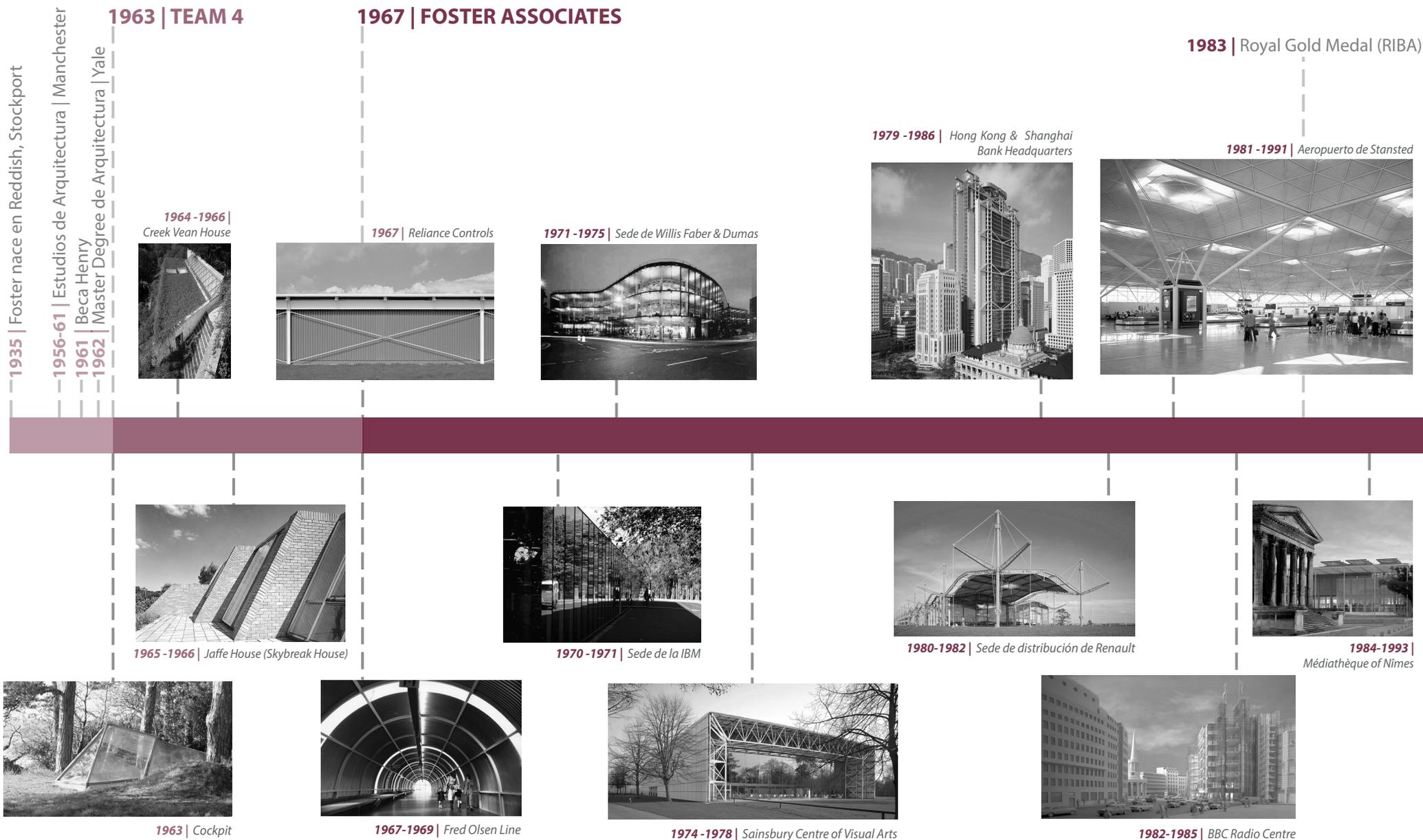
1980-1982 | Sede de distribución de Renault

1982-1985 | BBC Radio Centre

1981-1991 | Aeropuerto de Stansted

1983 | Royal Gold Medal (RIBA)

1984-1993 | Médiathèque of Nimes



1989 | FOSTER + PARTNERS

1990 | Premio de Arquitectura Contemporánea Mies Van der Rohe

1992 | Medalla de Oro de la Academia Francesa de Arquitectura

1994 | Medalla de Oro del AIA

1998 | Premio Stirling

1999 | Premio Pritzker

2009 | Premio Príncipe de Asturias

1987 - 1991 |
Century Tower



1991 - 1997 |
Commerzbank



1994 - 2000 |
Great Court at British Museum



1996 - 2000 | *Millennium Bridge*



2000 - 2006 |
Hearst Tower



2003 - 2008 | *Beijing Airport*



1985 - 1991 |
Sackler Galleries



1992 - 1994 | *Nuevo Reichstag alemán*



1995 - 1997 | *SECC Conference Centre*



1988 - 1991 | *Crescent Wing*



1993 - 2004 | *Diaducto Millau*



1997 - 2004 |
30 St Mary Axe



1998 - 2002 | *Ayuntamiento de Londres*

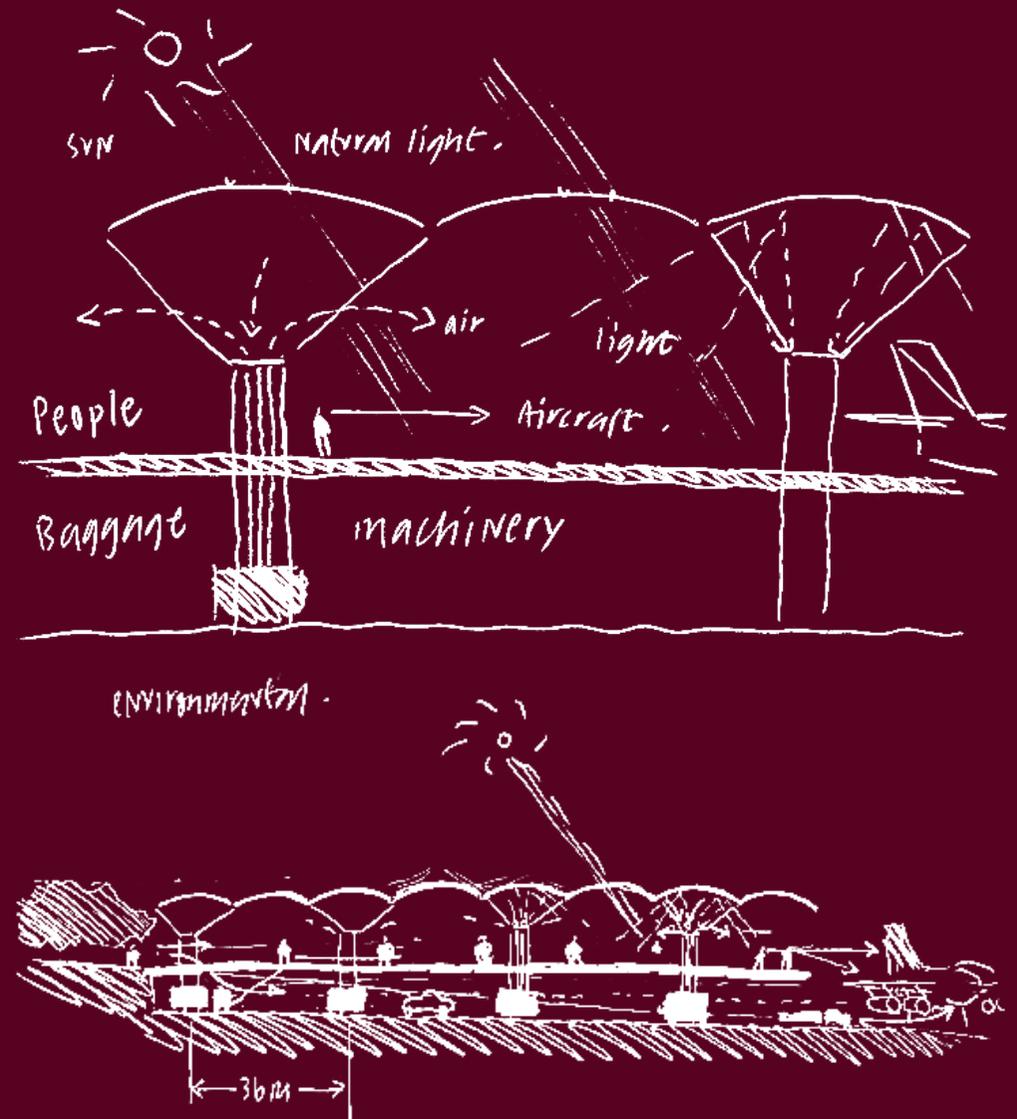


2002 - 2009 |
Torre Caja Madrid



2007 - 2008 | *Masdar City*

2004 | Premio Stirling



03. EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO

03.01 | CONTEXTO HISTÓRICO

03.01.01 | EL AEROPUERTO DE STANSTED

El aeropuerto de Stansted se construyó en 1942 como base militar para las fuerzas aéreas británicas y estadounidenses que lucharon en la Segunda Guerra Mundial. Se utilizó como aeródromo de bombarderos y almacén de mantenimiento y suministros.



Imagen 03.01. Bombardeo B-26 Marauder en Stansted (1944)



Imagen 03.02. Avión de pasajeros Avro York con los hangares de Stansted al fondo (1955)

Una vez acabada la guerra se planteó la idea de convertirlo en el tercer aeropuerto de Londres, lo que no llegó a formalizarse pues no se daba la necesidad. De esta manera, fue tomado por el Ministerio del Aire y utilizado por la Unidad de Mantenimiento. Seguidamente fue utilizado como alojamiento de los prisioneros de guerra alemanes.

Después de esto se utilizó como aeropuerto civil y en la década de los setenta como base antiterrorista donde debían de aterrizar los aviones secuestrados.

03.01.02 | LAS GRANDES NAVES

Durante la década de los 70, en Inglaterra, la arquitectura se convirtió en una disciplina independiente, debido a que se promulgó la conservación y se prohibió la alteración o demolición de unos 50.000 edificios antiguos.

La importancia que se le dio a la arquitectura histórica se vio reforzada por la construcción de un edificio de oficinas disfrazado de clasicismo y por el fracaso del intento de construir en el centro de Londres un proyecto póstumo de Mies Van der Rohe.

En Inglaterra siempre se ha tendido a promulgar el urbanismo histórico, de manera que las infraestructuras económicas del país debían asentarse en otra parte. Con todo esto llegamos a la década de los 80, etapa en la que se empieza a construir una nueva arquitectura no histórica, fuera de las ciudades, en las principales vías de comunicación, las autopistas. Así, los nuevos centros operativos de la economía del país dan paso a un nuevo tipo de arquitectura: la arquitectura de las "grandes naves", que pasa a ser internacional, no nacional como ocurre con la arquitectura histórica.

La segunda diferencia de esta arquitectura de las "grandes naves" radica en ser inmensa, horizontal y lisa, debido a su emplazamiento en espacios rurales, en contraposición con la arquitectura histórica: más pequeña, vertical y ornamentada.

Constituye el primer paso de producir las megaestructuras que ya plantearon Buckminster Fuller en los cincuenta y Banham y Price en los sesenta.

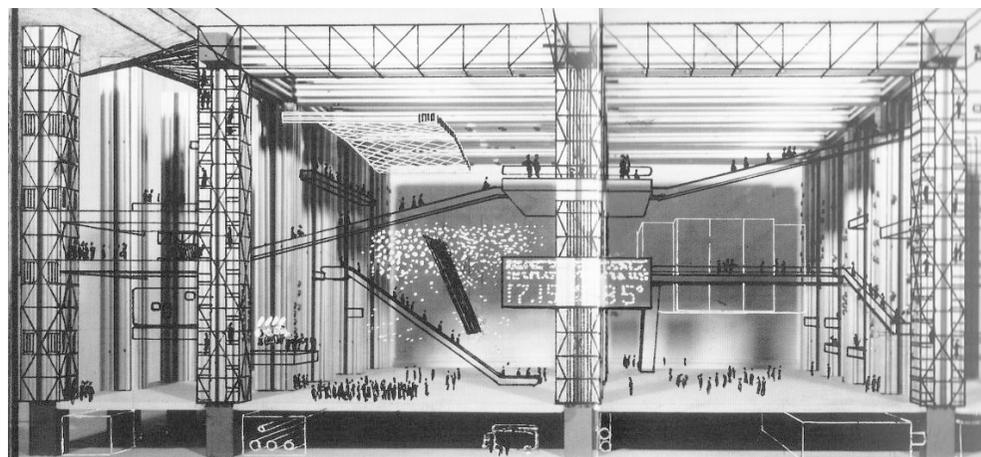


Imagen 03.03. Propuesta del Fun Palace de Cedric Price (1964)

03.02 | EMPLAZAMIENTO

El inventor del género

Con una larga relación con las “grandes naves”, se puede reconocer a Foster como inventor del género, puesto que en 1967 ya llevó a cabo la Reliance Controls [imagen 03.04] junto a Rogers y en 1972 con un proyecto no construido de 40.000 m² para una empresa internacional de actividades comerciales y recreativas. En 1974, se planteó otro proyecto de 160.000 m², también no ejecutado. Los primeros ejemplos de Foster que si se construyen son la fábrica SAPA de Tibshelf y el almacén para Modern Art Glass [imagen 03.05], pudiendo observar en ellos características que luego estarán presentes en la terminal de Stansted.



Imagen 03.04. Reliance Controls (1967)

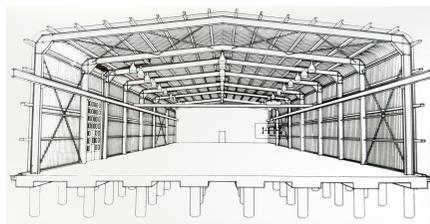


Imagen 03.05. Modern Art Glass (1972-73)

Sin embargo, los precedentes a la nueva terminal no son simplemente edificios comerciales.

Un ejemplo claro de esto consiste en el Sainsbury Centre for Visual Arts (1974-78) [imagen 03.06], edificio proyectado como galería de arte y también perteneciente a la tipología de “gran nave”.

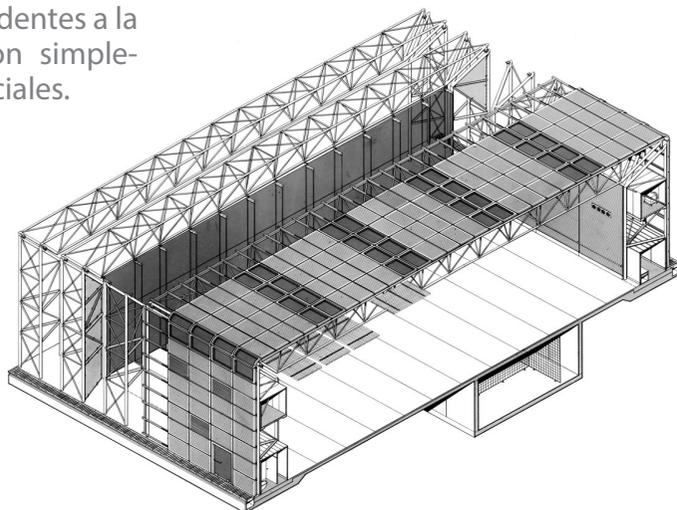


Imagen 03.06. Sainsbury Centre for Visual Arts (1974-78)

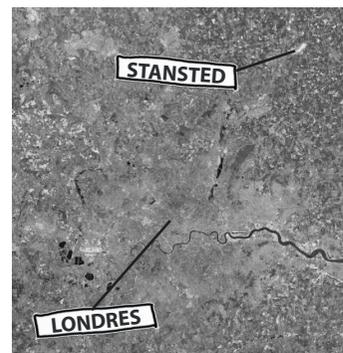


Imagen 03.07. Relación Londres-Stansted



Imagen 03.08. Emplazamiento del Aeropuerto de Stansted

Con 50.000 m² y situada en el condado de Essex, a 50 kilómetros al norte de Londres, la nueva terminal de Stansted consiste en la intersección cubierta de tres vías de transporte distintas: La pista de aterrizaje, una de las más largas de Inglaterra, la autopista M11, que da acceso a la M25 y, por tanto, a todo el sistema de autopistas nacionales, y la línea de ferrocarril Londres-Cambridge, mediante la estación subterránea de la terminal, que conecta con el centro de Londres en 40 minutos.

03.03 | ENCARGO

En 1981 la British Airport Authority encarga a Foster Associates un estudio arquitectónico y urbanístico para ver si era viable un proyecto para desarrollar las nuevas estructuras destinadas a los pasajeros del aeropuerto londinense de Stansted, el tercer aeropuerto de la capital en aquel momento, después de Heathrow y Gatwick. El proyecto consistiría en la nueva terminal, situada al otro lado de la pista de aterrizaje de la terminal existente. En este mismo período de tiempo, el edificio de Renault estaba en fase de diseño.

El encargo consistía en diseñar un espacio que acogiera las instalaciones de los pasajeros así como sus equipajes y los sistemas de tránsito de manera que el intercambio de transporte se hiciera con la máxima celeridad.

03.04 | IDEA

Norman Foster es un apasionado de la aviación. Su emoción e interés por los vuelos le han llevado a pilotar aparatos de vuelo sin motor, helicópteros y reactores. La necesidad de Foster era devolver a este tipo de transporte de la emoción que tenía en los años veinte y treinta, en los cuales los pasajeros directamente pasaban a la pista para emprender su vuelo. Esta necesidad es debida a que en las últimas décadas, los viajes en avión se habían convertido en algo no agradable para el usuario.

Con este sentimiento por todo lo relacionado con los viajes en altura, Foster Associates planteó una sola cubierta que recogía a su vez un inmenso vestíbulo con todos los equipamientos así como la estación de ferrocarril en la planta inferior. Desde un primer momento se plantearon tres requisitos fundamentales: una estructura mínima, un máximo de luz natural y el ocultamiento máximo posible de las instalaciones.



Imagen 03.09. Croquis preliminares donde se muestran los 3 requisitos fundamentales

Así, después de diferentes modificaciones llegaron, tomando como referencia la modulación del edificio de Renault, al proyecto final, formado por casquetes y paraguas.

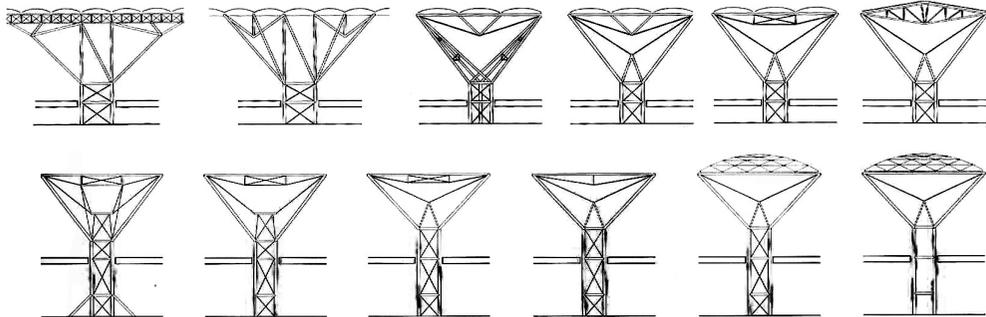


Imagen 03.10. Propuestas y modificaciones del módulo

03.05 | ORGANIZACIÓN

El tercer aeropuerto de Londres está organizado en función del recorrido de los pasajeros desde que llegan al aeropuerto hasta su subida al avión. Así, la arquitectura de Foster vuelve a estar hecha para las personas. Lo que Foster pretende es que las personas se sientan tranquilas y que se desdramatice la partida.

Esto es debido a que si en los años veinte y treinta los viajes en avión se consideraban algo directo, pues los pasajeros pasaban directamente a la pista de despegue, en los últimos años se habían convertido en algo no agradable, oscuro y con un difícil recorrido, que provocaba un malestar en sus usuarios.

La finalidad que quiere conseguir Foster es devolver la grandeza de este tipo de transporte, como sí ocurría en estaciones de tren, bellas y de gran magnificencia, que dotaban el viaje en ferrocarril de un carácter más amable.

03.06 | SEPARACIÓN POR NIVELES

Como ya había desarrollado con anterioridad en los edificios de la Fred Olsen Line, Foster decide volver a llevar a cabo el esquema de los dos niveles.

De esta manera, vuelve a posicionar a los pasajeros en la planta superior, mientras que en la inferior se encuentran todas las instalaciones y los recorridos del equipaje, así como la estación de ferrocarril.



Imagen 03.11. Croquis de los dos niveles y las relaciones entre ellos

Con este esquema consigue que los recorridos de los pasajeros sean más directos y rápidos y que no se vean interrumpidos entre ellos

03.07 | FORMA Y VOLUMEN

03.07.01 | LOS ÁRBOLES ESTRUCTURALES

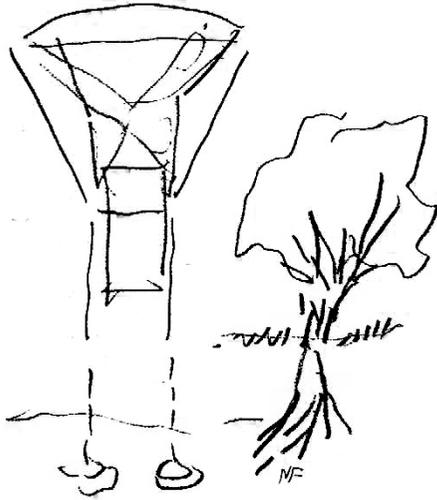


Imagen 03.12. Croquis de Foster en el que se ve la semejanza de la estructura con un árbol

Foster consigue plantar 36 “árboles” cuádruples de acero tubular macizo colocados cada 36 metros. Los troncos consiguen alcanzar una altura de 17 metros, los cuales se encuentran a media altura con el forjado de hormigón del vestíbulo, encofrado in situ. A los 17 metros, las ramas de los árboles se despliegan con la finalidad de soportar los casquetes de la cubierta, ligeras cúpulas formadas por mallas triangulares situadas a 23 metros del suelo del sótano. Todos los árboles se encuentran conectados mediante el forjado de hormigón, el cual se encuentra a 8 metros del terreno.

03.07.02 | LA CUBIERTA

Se presenta con una ligereza visual increíble. Parece flotar sobre los 15 metros que la separan del suelo de vestíbulo. Esto es debido a que no existen ni instalación eléctrica ni de calefacción en el interior, así como tampoco un sistema contraincendios. Este es uno de los principales aspectos tecnológicos pues la altura del edificio permite que el humo ascienda sobre los pasajeros, de manera que éstos puedan evacuar el edificio con una visual despejada, aspirándolo por el punto alto de los troncos.

Otro de los aspectos tecnológicos más importantes del proyecto se encuentra en la cubierta y consiste en el sistema de evacuación de las aguas de lluvia. El agua llena completamente el conducto de evacuación y fluye en espiral a lo largo de un volumen de aire central. Esto provoca un efecto sifón que permite evacuar el agua de manera horizontal, reduciendo la sección de los tubos y permitiéndolos planos, sin pendiente, lo que favorece a la cubierta.





Imagen 03.14. Vista interior del vestíbulo

03.08 | LA LUZ

El trabajo de la luz en la nueva terminal de Stansted es de una maestría propia de Foster. Juega con ella de manera que dota al vestíbulo de una apariencia insólita para los aeropuertos de la época.

La luz es modulada y filtrada. Cada cúpula está abierta en su centro. Durante el día, para evitar la iluminación directa se disponen unos paneles perforados bajo los huecos cenitales que filtran la luz, reflejándola en la cubierta. Por la noche, estos paneles provocan el efecto inverso: reflejan la luz que proviene de los focos ocultos en el tronco de la estructura y mitigan el efecto de superficie oscura que producen estos huecos.



Imagen 03.15. Filtración de la luz diurna



Imagen 03.16. Mitigación de la superficie oscura



Imagen 03.17. Vista exterior nocturna. Se puede ver como la cubierta parece que flote

03.09 | FLEXIBILIDAD

Foster sigue planteando la necesidad de crear espacios flexibles, que puedan cambiar en el tiempo según las necesidades y la funciones que se precisen. De esta manera, el vestíbulo se encuentra desprovisto, salvo las instalaciones fijas en la estructura, de elementos inmóviles. Así, los diferentes stands pueden ser rápidamente desmontados y ubicados en otros espacios.

Pero sin duda, el ejemplo más claro y significativo es la estación del ferrocarril en la planta baja, la cual no estaba planteada en el programa inicial y se desarrolló en una etapa tardía del proyecto.



Imagen 03.18. Estación de tren ubicada en la planta inferior del aeropuerto

03.10 | RELACIÓN CON LA NATURALEZA

Como se ha explicado en el apartado de las "grandes naves", el Aeropuerto de Stansted es un edificio horizontal que solamente se percibe su grandiosidad desde el aire.



Imagen 03.19. Vista aérea del aeropuerto

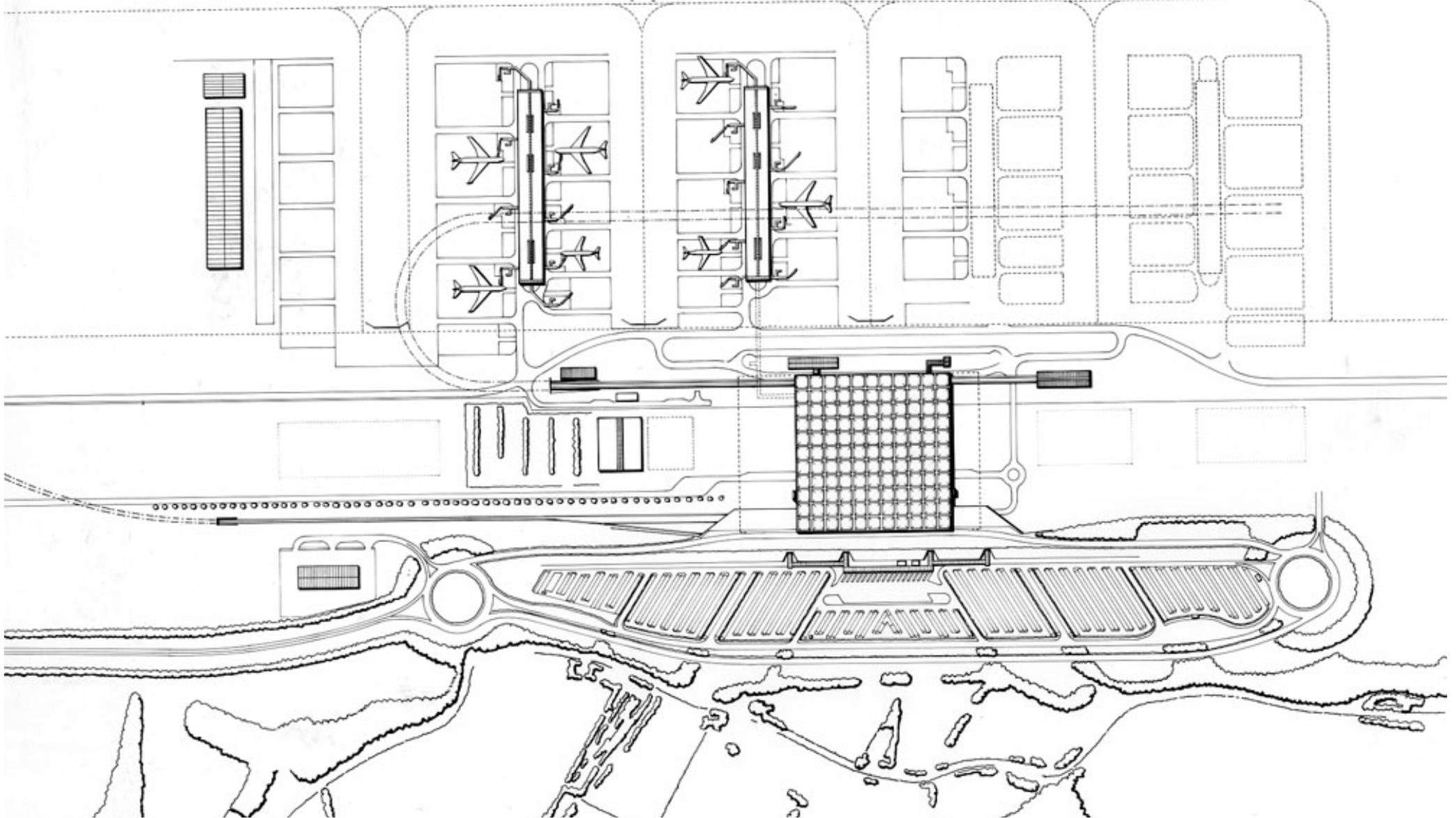
La topografía del terreno, con sus cambios de nivel, provoca que la visión del edificio desde la cota del suelo se dificulte, puesto que una de las premisas del proyecto fue mantener el arbolado existente, el cual es igual o supera en altura la nueva terminal.



Imagen 03.20. Vista a cota de suelo del aeropuerto

03.11 | DOCUMENTACIÓN GRÁFICA

03.11.01 | PLANTA CUBIERTA | E. 1.1000



03.11.02 | PLANTA COTA CERO | E. 1.250

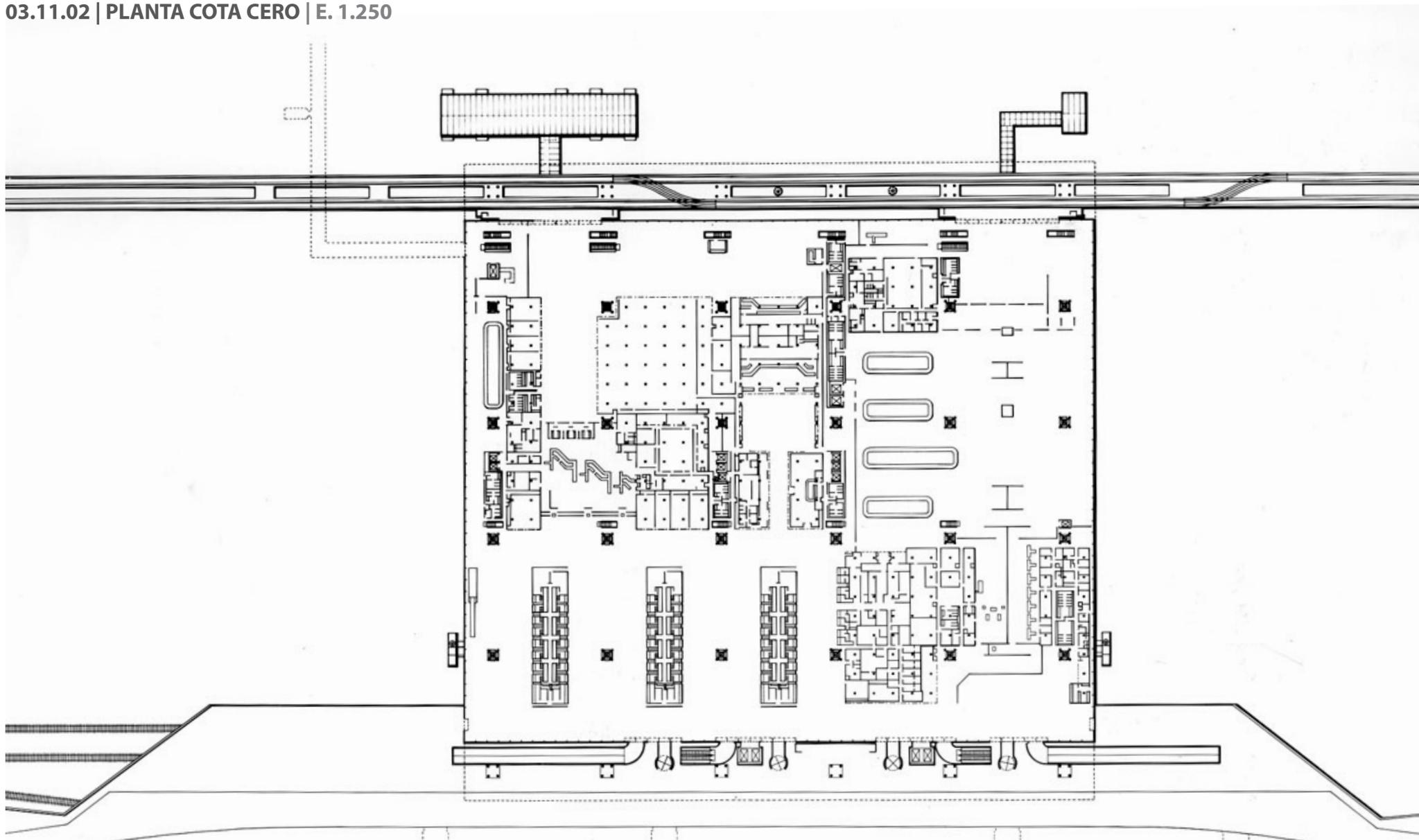
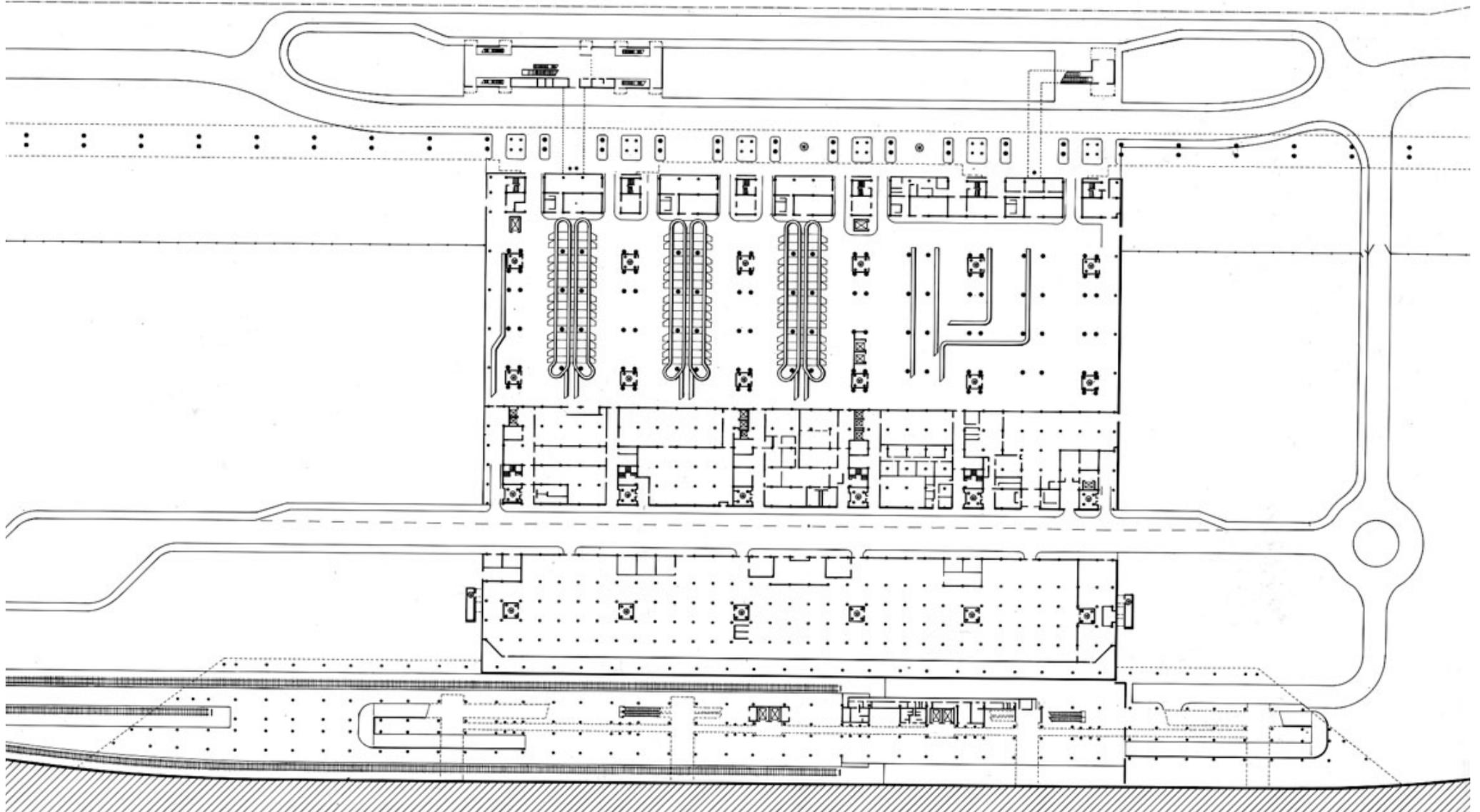


Imagen 03.22. Planta del vestíbulo principal

03.11.03 | PLANTA SÓTANO | E. 1.250



03.11.04 | PLANTAS DEL EDIFICIO SATELITE | E. 1.500

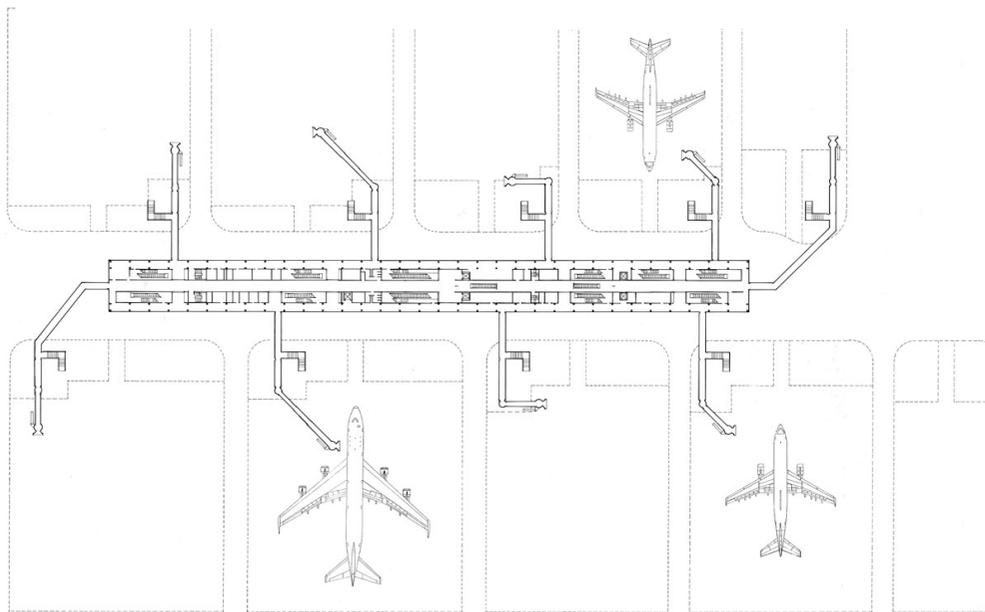


Imagen 03.24. Planta primera del edificio satélite

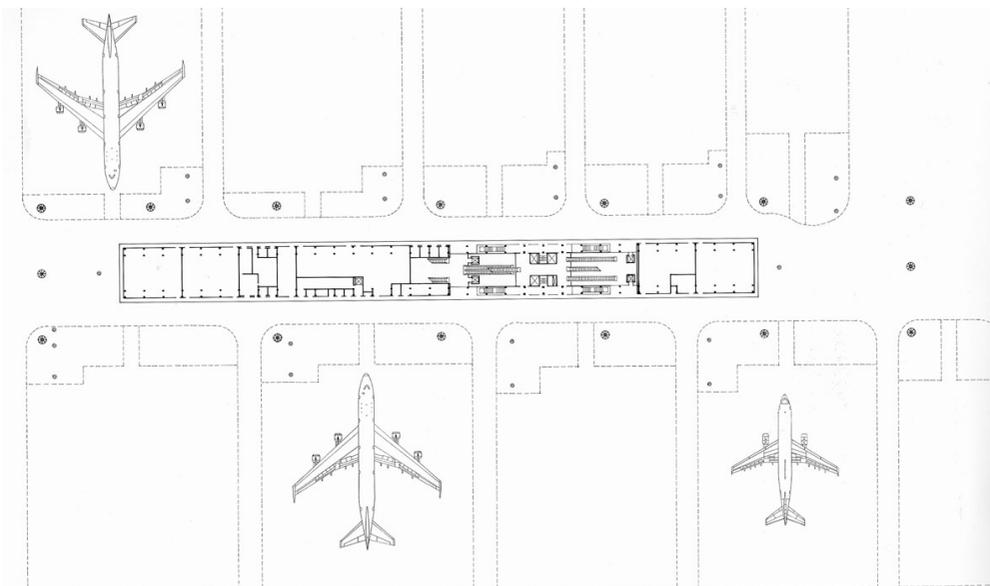


Imagen 03.25. Planta baja del edificio satélite

03.11.05 | ALZADO CON PERSPECTIVA



Imagen 03.26. Alzado donde se ven las dos plantas

03.11.06 | DETALLE DE LA SECCIÓN

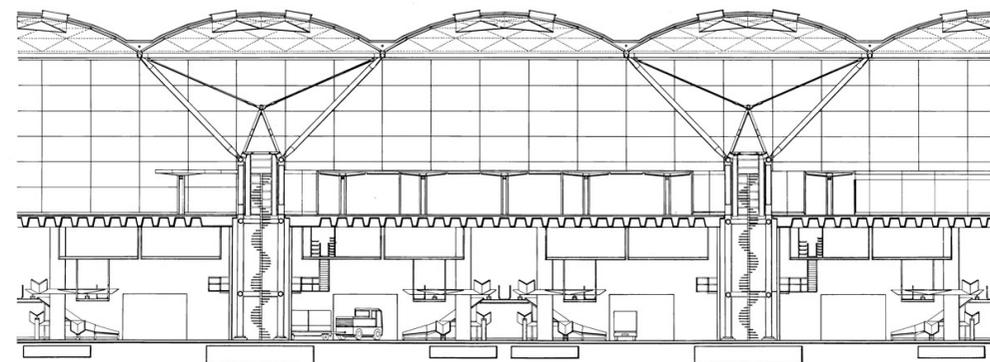


Imagen 03.27. Sección de las dos plantas y el sistema estructural

03.12 | MATERIALIDAD Y CONSTRUCCIÓN

El punto de partida, como se ha comentado anteriormente, radicaba en la creación de un vestíbulo como un volumen único. Con esto se conseguía que los viajeros supieran siempre dónde estaban y hacia dónde se dirigían, gracias al cerramiento de vidrio que envuelve la totalidad del espacio.

El problema que se planteaba es que la nueva terminal consistía en un único compartimento de fuego de 600.000 m³. La solución básica hubiera consistido en compartimentar el enorme espacio y disponer sistemas de protección contra el fuego y ventilaciones de humo. Esto suponía perder la unidad espacial y desechar una de las ideas fundamentales del proyecto: la cubierta totalmente libre de instalaciones. Además, se debía proporcionar acceso para el mantenimiento y pasarelas o andamios en el vestíbulo.

Para solucionar el problema se contactó con Margaret Law, de Ove Arup & Partners y experta en la arquitectura contra incendios. Con un enfoque analítico y científico llegó a la conclusión de que el gran volumen no suponía un problema si no su propia solución.

En aquel momento la altura normal de la cubierta en los aeropuertos era de unos seis metros. Sin embargo, Stansted estaba planteado para ser más del doble de esa altura, de difícil justificación para el cliente. Sin embargo, con lo planteado por Law, la altura adicional no era un simple capricho del arquitecto sino que actuaba como un depósito de humo (debido a que el humo tiende a ascender). Se conseguía pues aumentar el tiempo en el que el edificio podía ser evacuado. El humo podría ser extraído hacia abajo, a través de las cimas de los conductos del centro de cada árbol estructural.

Para no tener que disponer rociadores, todas las áreas de alto riesgo se encerraron en las denominadas “cabinas”, cuya estructura gozaba de una hora de resistencia al fuego y de persianas cortafuegos. Esto suponía que los pasajeros se ubicarían en la zona protegida y que por tanto, el uso de rociadores no era necesario.

De esta manera Foster consiguió lo que quería a través del análisis riguroso y la determinación por preservar la pureza del concepto arquitectónico.

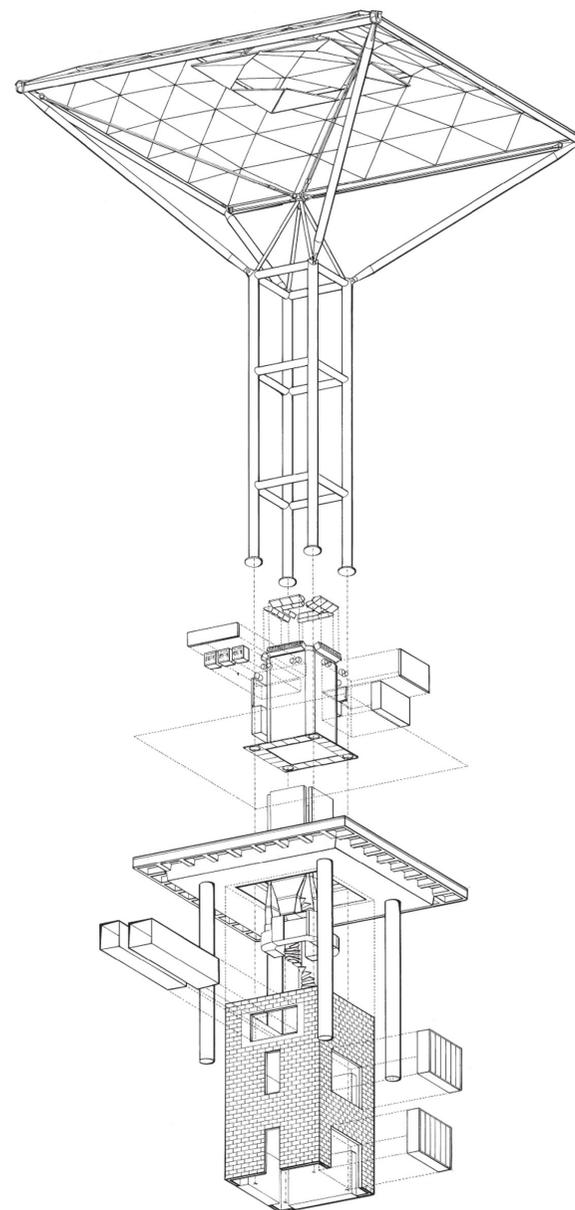


Imagen 03.28. Descomposición del sistema del árbol estructural

03.12.01 | ÁRBOLES ESTRUCTURALES

La nueva terminal se sustenta mediante columnas redondas ubicadas en la planta sótano que, con una distancia de 6 o 12 metros entre sí, soportan un forjado de losa aligerada de hormigón armado de 850 mm de espesor en los nervios con armaduras y de 450mm en las superficies aligeradas, la cual forma el piso del vestíbulo y el techo del sótano donde se encuentra el manejo de los equipajes y los servicios. Arquitectónicamente, sin embargo, la parte de mayor importancia de la estructura es la rejilla de árboles de acero dispuestos cada 36 metros, que soportan, como se ha explicado con anterioridad, una cubierta ligera y libre de servicios.

Cada árbol tiene un tronco formado por cuatro columnas de acero macizo y cuatro ramas esbeltas. Estas ramas están unidas por un único tornillo a una pirámide en la parte superior del tronco. Los árboles sostienen una rejilla cuadrada de perfiles tubulares de acero que actúan como vigas principales de la cubierta. Cada cuadrado se cierra mediante una cúpula de acero reticular, siendo todos los perfiles de acero de sección circular.

Cabe mencionar que la cubierta fue construida en primer lugar, dando lugar a un recinto protegido de la intemperie, con la finalidad de proteger la construcción inferior de hormigón. Los árboles son por lo tanto independientes del hormigón, perforando la losa reticular y descansando sobre las zapatas aisladas.

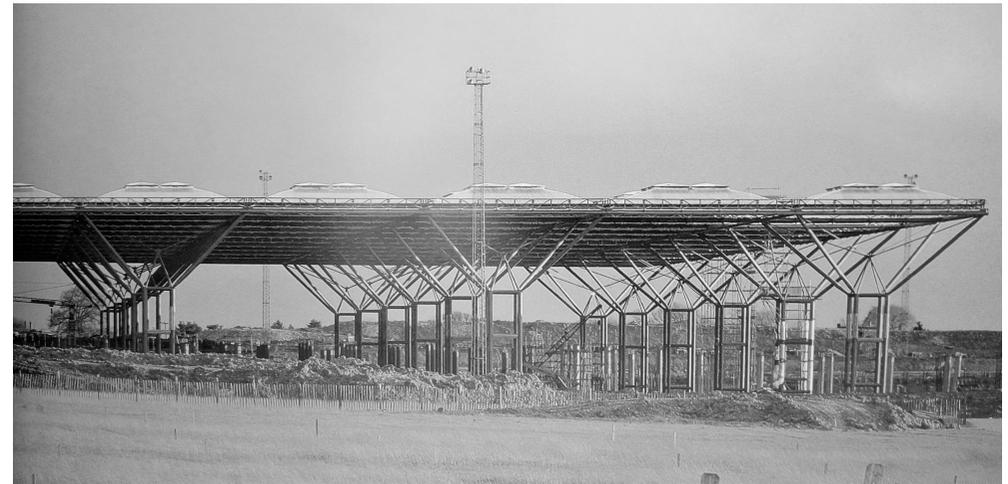


Imagen 03.32. Vista de la estructura metálica con la cubierta ya dispuesta (Verano de 1987)



Imágenes 03.29 - 03.31. Construcción de la estructura metálica antes de los elementos de hormigón (Verano de 1987)



Imágenes 03.33- 03.36. Construcción de los elementos de hormigón ya finalizada (Principios de 1989)

03.12.02 | CONTENEDORES DE SERVICIO

Puesto que no hay servicios mecánicos ni eléctricos en la cubierta o en las paredes, el aire, la luz y la energía tienen que entregarse al vestíbulo desde el sótano a través de los conductos en los troncos de los árboles. Así, cuatro conductos rectangulares de suministro de aire, dispuestos formando un cuadrado, forman las paredes de un conducto central de retorno del aire que desciende a un recinto antiincendios en el sótano.

El conducto de retorno también actúa como un respiradero automático de humo. Dentro de este espacio se ubica una escalera de caracol de metal que conecta con el sótano.

Alrededor de la parte exterior de la caja se montan los servicios secundarios como pueden ser las omas de corriente, las bobinas de mangueras, la iluminación, las señales lumionas y los carteles de información para los pasajeros.

Cabe especificar que el conjunto no está unido al suelo de hormigón, sino a la superestructura de acero, con lo cual se consigue que estos no se vean afectados por el movimiento diferencial.

Los contenedores, como se puede observar, no son elementos hermosos. Sin embargo, su belleza reside en el hecho de que eliminan toda la fealdad que una instalación de servicios no coordinada puede ocasionar en un edificio de grandes dimensiones.

La elegancia y la simplicidad de todo el edificio depende de estas piezas de instalaciones compactas y totalmente integradas.

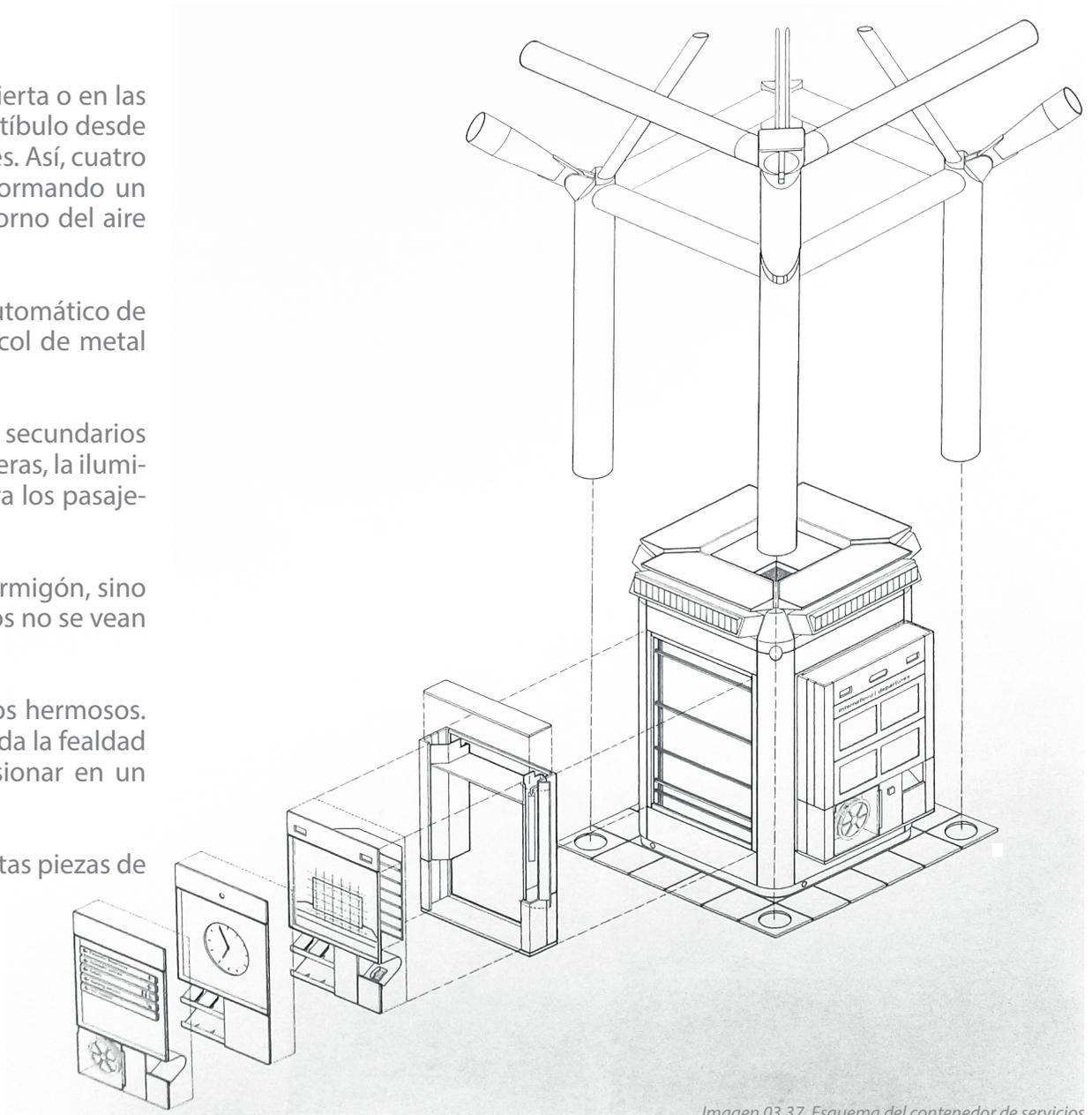


Imagen 03.37. Esquema del contenedor de servicios

03.12.03 | LA CUBIERTA DEL VESTÍBULO

Para los paneles de la cubierta se exploraron distintas soluciones. El problema que se planteaba era la necesidad de conciliar las demandas conflictivas de absorción acústica y de reflectividad de la luz. Entre las diferentes discusiones y opciones se llegó a la solución de las bandejas de acero triangular microperforado rellenos de una colcha blanca, reflectante, la cual absorbía el sonido.

Las cúpulas del techo no son en realidad cúpulas, sino que están formadas por cuatro cilindros intersectados. Esto es de gran importancia debido a que la membrana impermeable consiste en una sola lámina de PVC "Sarnafil". Se fija mecánicamente a las correas en Z en una cubierta de metal perfilada, con dos capas de aislamiento entre ellas. En las juntas entre las cúpulas, la cubierta simplemente puentea el hueco, formando un conducto triangular para colocar las tuberías horizontales de la recogida de aguas pluviales.



Imagen 03.38. Detalle de la cubierta de la terminal

Debido a que la membrana impermeable se fija mecánicamente, existe el riesgo de que en condiciones adversas se levante por la succión del viento. Para evitar esto, se instalaron alerones en los aleros para reducir la turbulencia y promover un flujo de aire laminar suave sobre el perímetro de la cubierta. Estos alerones están formados por paneles de aluminio curvados. La comparación con el borde delantero de un ala de avión es ineludible, tanto funcionalmente como visualmente.

La recogida del agua de lluvia a partir de 39.204 m² de techo continuo no era tarea fácil y más con la premisa de no establecer un sistema convencional para no lidiar con salidas cada 18 metros.

La solución fue radical y se encontró en un sistema desconocido en Inglaterra, pero muy utilizado ya en Finlandia y Rusia. Por ejemplo, Alvar Aalto ya lo había utilizado en el Finlandia Hall (1962-1971).

El sistema se llamaba "UV", expresión que en finlandés significaba "flujo completo". La diferencia entre este nuevo sistema y el sistema tradicional radica en que en el sistema convencional el agua gira en espiral alrededor de la pared de una tubería descendente, con el núcleo en aire, mientras que en el sistema UV la bajante va llena.

Esto provoca una acción sifónica que tira del agua a lo largo de la tubería horizontal. Las salidas del agua de lluvia son sumideros que permanecen cerrados hasta que se obtiene la suficiente altura de agua para dar lugar al efecto sifón.

De esta manera, el sistema ofrece dos ventajas: las tuberías pueden ser más pequeñas puesto que funcionan a pleno rendimiento, y las tuberías horizontales no precisan de pendiente.

En el caso particular de la terminal de Stansted, las bajantes son en promedio de solo 89 mm de diámetro interno y hay mucho espacio en el conducto triangular entre cúpulas.

Las únicas partes visibles del sistema son las delgadas derivaciones expuestas en cada hueco fuera de las paredes de flanco del edificio, que se estrechan a medida que se aproximan al nivel del suelo.

03.12.04 | LUCERNARIOS

En el interior, el techo se transforma visualmente debido a la luz del día. Esto se logra mediante la combinación de reflectores de luz suspendidos y paneles de techo blancos. Cada cúpula cuenta con cuatro lucernarios triangulares que forman el 3% del área total del techo. Éstos inundan el espacio interior con la luz solar, provocando un ahorro de energía considerable. Los lucernarios están formados por un doble vidrio de baja emisividad fijados a los bordes superiormente, de manera que el agua de lluvia discurre por el techo sin obstrucción y sin entrar en el interior.

En los lucernarios, el principal problema es el dislumbramiento de los usuarios. Para resolver esto, era necesario reducir el contraste entre el cielo brillante y la sombra del techo. La solución plantada es simple y elegante, como se ha explicado en el apartado "03.08 | LA LUZ".



Imagen 03.39. El interior de la terminal iluminada por el cerramiento y los lucernarios

03.12.05 | MURO CORTINA

El cerramiento del vestíbulo está formado por paneles de 3,6 metros de ancho por 2 metros de alto con un doble acristalamiento sellado, con un revestimiento de baja emisividad y relleno de gas inerte. Esto da un nivel más que aceptable de aislamiento térmico. El gas inerte no permanece definitivamente sellado más de 4 o 5 años pero es suficiente para provocar un ahorro energético considerable.

Todo el vidrio está endurecido por seguridad y en aquellos puntos en los que no se le proporciona sombra, el vidrio se entrelaza con dos capas de PVB translúcido, con lo que se consigue una reducción de la ganancia de calor de más del 60%.

Sin embargo, no se pueden establecer como muros cortina en el sentido estricto ya que no cuelgan del techo sino que se anclan al suelo. Tienen que abarcar los 12 metros de altura del vestíbulo de una sola vez y deben soportar la carga de viento de 1,4 kN. Para Foster, el dilema consistía en el diseño de un marco de apoyo importante que coincidiera con la increíble ligereza visual de la estructura de la cubierta.

Por esta razón, todos los montantes y travesaños son perfiles de acero rectangulares huecos de 120x80 mm, formando un armazón completamente alineado. Se consigue de esta manera abarcar los 3,6 metros horizontalmente aunque no es posible solucionar los 12 metros verticales del muro cortina.

Para ello se añade un referzo en forma de 114 mm de diámetro, soldado mediante tacos a la cara interior de los perfiles rectangulares huecos. Por lo tanto, los dos actúan como los brazos de una armadura vertical, ahusada en los extremos donde el momento flector es menor.

Para fijar el vidrio a la cuadrícula se utilizó un tipo mecánico convencional, con tiras de aluminio atornilladas en los orificios preparados en el marco de perfiles rectangulares huecos.

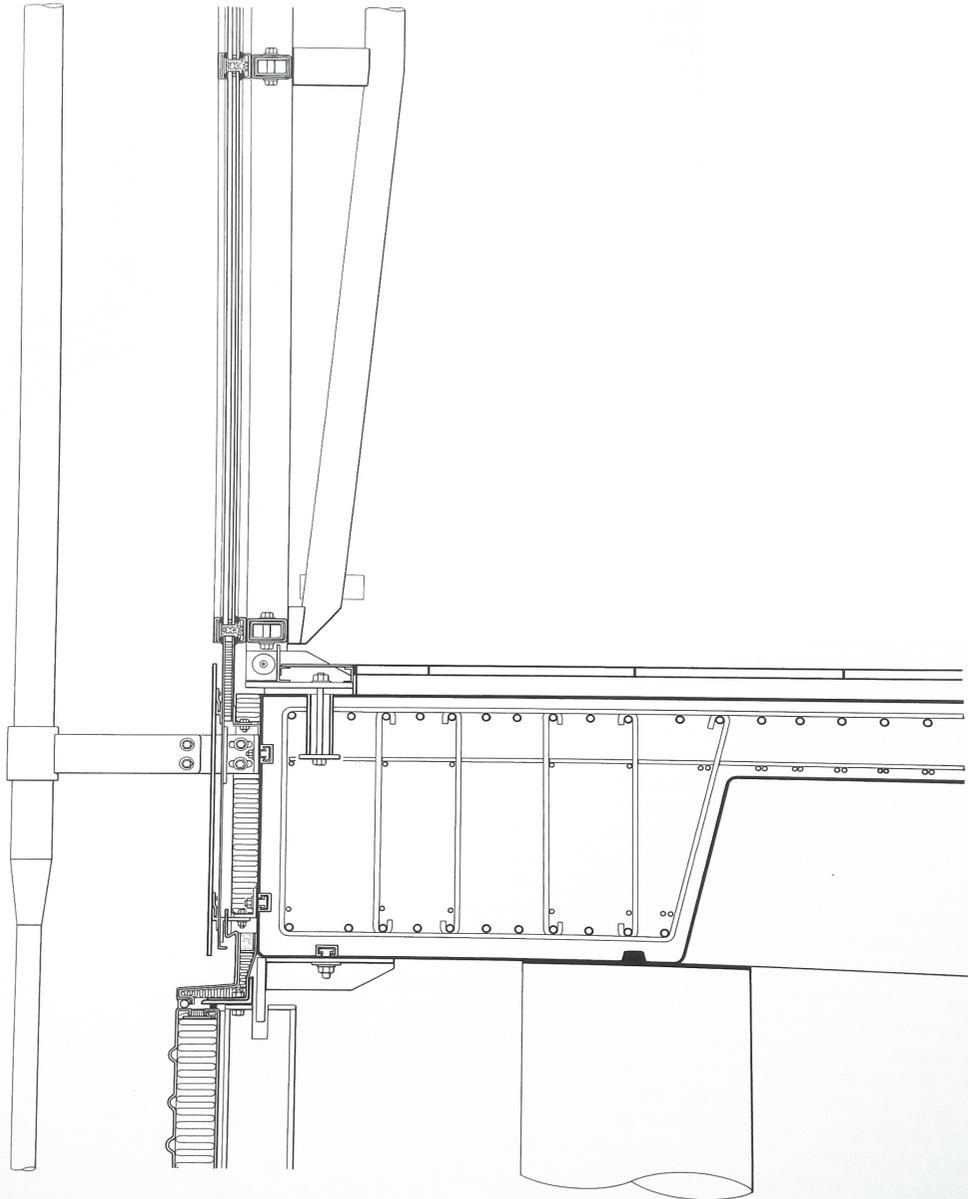


Imagen 03.40. Detalle constructivo del encuentro del muro cortina con el forjado

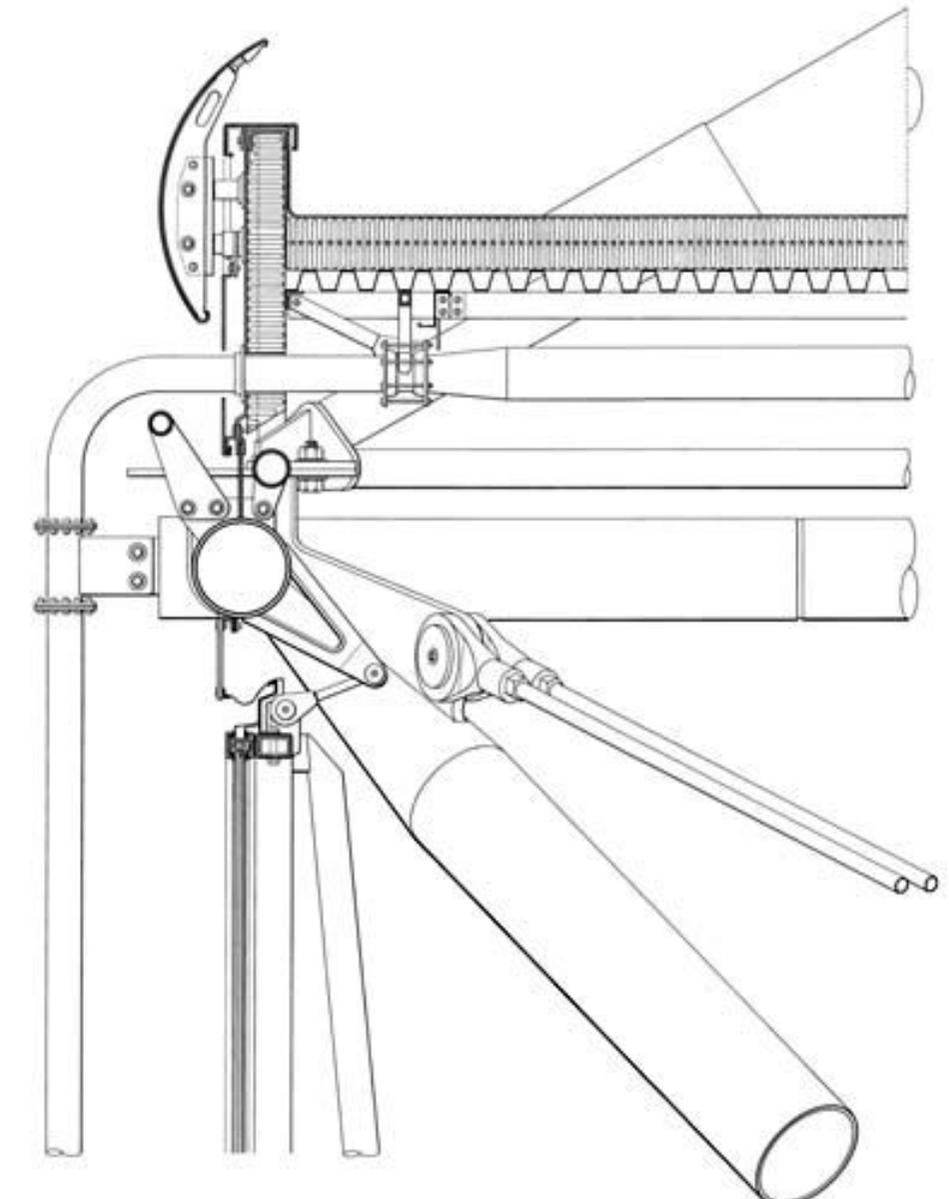


Imagen 03.41. Detalle constructivo del encuentro del muro cortina con la cubierta

A pesar de todos los esfuerzos, lo descrito anteriormente solamente cubría los parámetros estructurales estáticos del cerramiento. Así pues, el verdadero problema era dinámico y consistía en hacer frente a un posible movimiento diferencial entre el cerramiento y la cubierta de cualquier elemento hasta 120mm. Este movimiento viene ocasionado por la dilatación térmica y la deflexión bajo la carga de viento. Se aumenta por el hecho de que a diferencia del forjado de hormigón, en la cubierta no existen juntas de dilatación. Por lo tanto, el movimiento térmico es importante en todo el ancho del edificio. Surge el problema debido a que las paredes deben ser estabilizadas por la cubierta en la parte superior, pero la cubierta también tiene que moverse en cada dirección en relación con ellos.

Como solución, se realiza un complicado dispositivo articulado y soldado al interior de la viga del techo perimetral, libre de balancearse arriba y abajo, mientras que simultáneamente se desliza de lado a lado a lo largo de un pasador horizontal de acero inoxidable unido marco superior del cerramiento. Se consigue el aislamiento térmico mediante un elemento de vidrio templado conectado en su borde inferior a una tira flexible escondida detrás de un zócalo formado por un perfil de aluminio.



Imagen 03.42. Encuentro muro cortina y forjado



Imagen 03.43. Encuentro muro cortina y cubierta

03.12.06 | CERRAMIENTO DEL SÓTANO

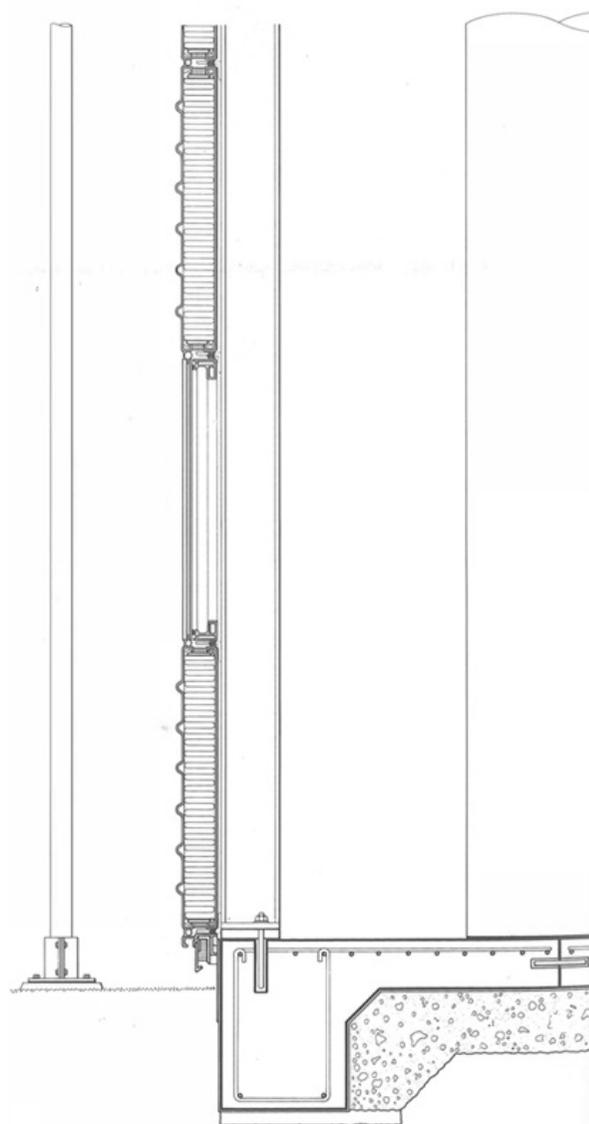


Imagen 03.44. Detalle constructivo del cerramiento del sótano

El cerramiento exterior del sótano es muy diferente del cerramiento de doble acristalamiento del nivel superior, pero no por ello menos sofisticado. La mayoría de los paneles son de aluminio rigidizado en marco de plástico con aislamiento mineral y revestido de acero. Son la mitad en altura de los paneles del nivel del vestíbulo, manteniendo los 3,6 metros de anchos, principalmente para permitir la entrada de vehículos.

Paneles de rejilla estándar y ventanas de acristalamiento de silicio estructural completan el conjunto de tipologías del cerramiento del sótano. Los paneles se apoyan en un marco de perfiles extrusionados de aluminio.

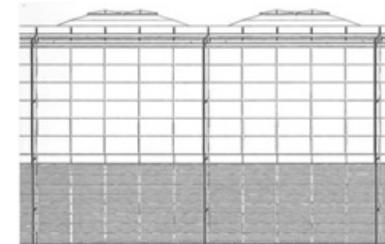


Imagen 03.45. Diferencia entre cerramientos

03.12.07 | CABINAS DEL VESTÍBULO

El vestíbulo de la terminal sería maravilloso si se encontrara completamente ininterrumpido. Sin embargo, tiene una misión que cumplir e implica más que sólo el desplazamiento de viajeros. Además de los mostradores de facturación, las cintas de equipaje y las pantallas de seguridad, hay tiendas, restaurantes y oficinas.

De esta forma, estos espacios tenían que ser alojados de manera que la unidad arquitectónica del vestíbulo no se rompiera. La solución se formalizó encerrándolos dentro de los límites de las cabinas de un solo piso. Estas cabinas tienen estructuras separadas y son servicios por separado, hacia arriba desde el sótano.

La estructura de la cabina supone una versión en miniatura de la estructura principal. Cuatro columnas sostienen un tejado plano de perfiles ligeros de acero y paneles acústicos de fibras de madera. Los conductos de aire subren entre las columnas

En el interior de la cabina el diseño es totalmente libre a elección del concesionario. Sin embargo, en el exterior se establecen unas reglas estrictas para mantener la unidad del espacio del vestíbulo y las vistas, no pudiendo aparecer ningún elemento por encima de los 3,75 metros de altura.

Para el caso de incendio, se dispone una banda en la parte inferior del techo que crea un depósito de humo, el cual se extrae a través de conductos de aire de retorno en el perímetro. Cuando el humo se ha disipado, las persianas enrollable automáticas y las persianas cortafuegos descenden detrás de la banda.

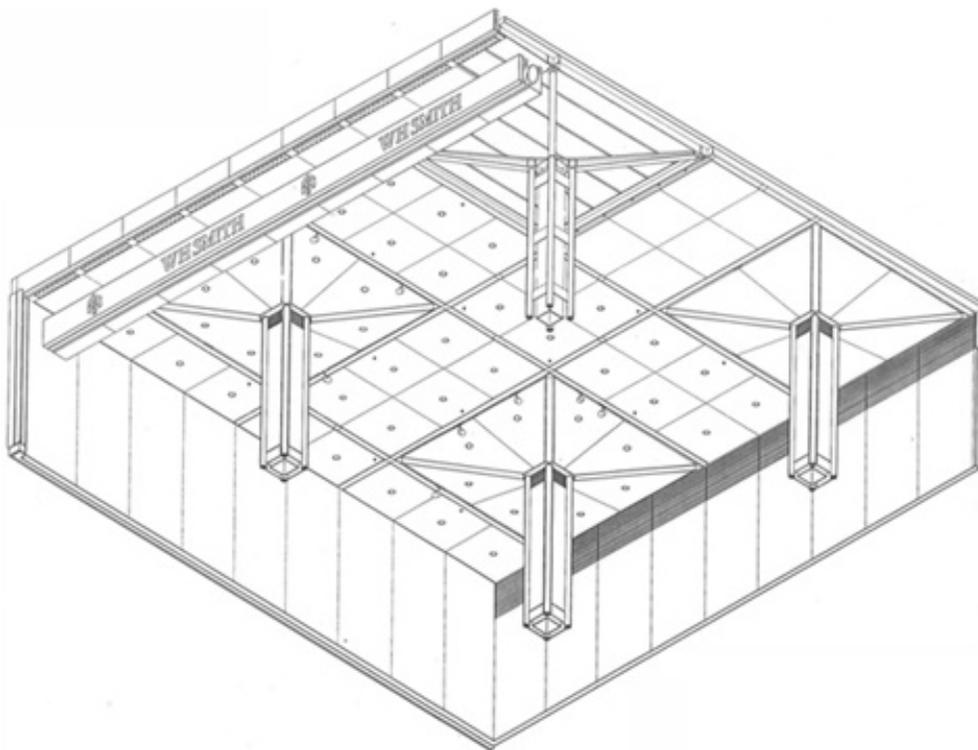


Imagen 03.46. Perspectiva axonométrica de las cabinas



Imagen 03.47. Vista exterior de la cabina



Imagen 03.48. Vista interior de la cabina

03.12.08 | MOSTRADORES DE FACTURACIÓN

Otro elemento importante en el diseño del interior fue el mostrador de facturación estándar. Se diseñó con un análisis riguroso del problema y desechando las soluciones convencionales, las cuales debían ser cuestionadas y probadas.

Para Foster, la solución de modificación o reemplazamiento de los mostradores convencionales residía en un kit de piezas formado por un bastidor básico de acero al que se le podían fijar paneles. El kit final consistía en paneles de plástico reforzado con fibras de vidrio, de acero inoxidable, de granito negro y de lino. Estos paneles se establecían de manera que pudieran ser reemplazados si se dañaban, sin necesidad de desmontar toda la estructura.

Detrás de los mostradores, unos paneles de acero unidos a un esqueleto de acero galvanizado ocultaban las cintas transportadoras de equipaje.



Imagen 03.49. Ejemplo de un mostrador de facturación del aeropuerto de Stansted

03.12.09 | ESTACIÓN DE FERROCARRIL

La estación de ferrocarril es uno de los servicios del sótano. La principal característica técnica es un muro de contención de 600 metros de largo y 8,5 metros de altura. El espacio está cerrado superiormente por la losa de hormigón que actúa como suelo del vestíbulo, de manera que la estación y el vestíbulo se solapan, hecho que provoca que los troncos de los árboles estructurales que sustentan el porche se paren en medio del andén.

Diseñada por Foster Associates y los arquitectos de British Rail, la idea de que un tren siempre estuviera presente en la estación provocó que no hubiesen salas de espera cerradas, solo una pequeña cabina dedicada a una ventanilla de venta, los servicios del supervisor y la maquinaria.

Los espacios para la comunicación vertical que conectan el andén con el vestíbulo se encierran mediante elementos de vidrio templado estructural.

El verdadero éxito del espacio radica en la iluminación de fondo, la cual se desarrolla mediante luz indirecta, iluminando todo el espacio. Así las paredes frías de hormigón son bañadas por una luz cálida y anaranjada.



Imagen 03.50. Vista del interior de la estación de ferrocarril

03.12.10 | EDIFICIO SATÉLITE

Por razones de seguridad, los pasajeros de llegada y salida de la terminal debían segregarse. Mientras que en el edificio principal de Stransted la segregación es horizontal para todos los pasajeros, en el edificio satélite, en la sección de embarque a los aviones, es vertical.

En la planta baja del edificio se ubica la maquinaria y el alojamiento de la tripulación de tierra. El único lugar donde los pasajeros no están en movimiento es en la sala de salida de la planta superior, formada por una plataforma en voladizo totalmente acristalada. Aquí también es prioridad fundamental la orientación de los pasajeros, los cuales tienen una vista panorámica de los aviones.

Por encima del piso del salón de salida, las columnas de hormigón dan paso al acero, con columnas de perfiles huecos de sección circular que soportan vigas en voladizo. Aquí, aunque de nuevo los marcos están unidos, aparece una ranura en forma de lucernario continuo.

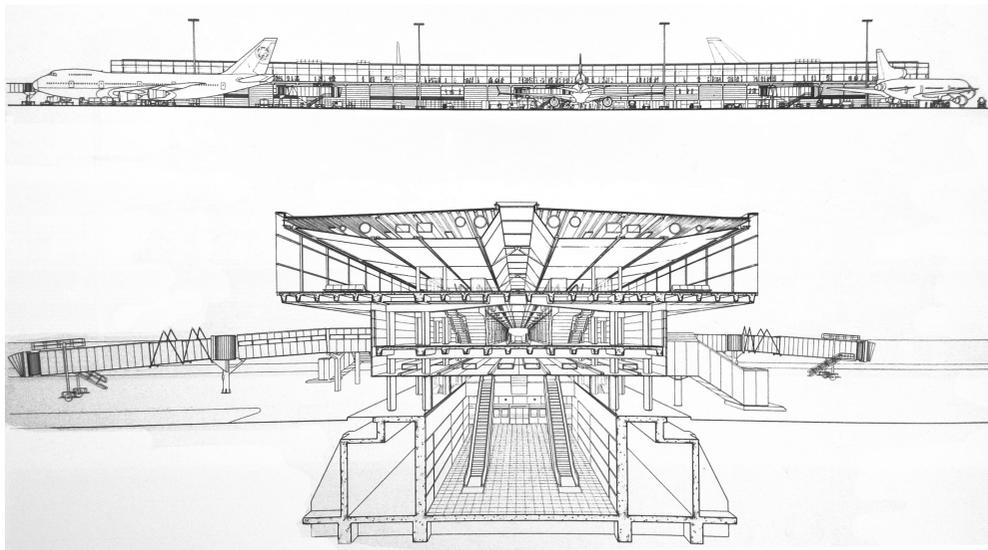


Imagen 03.51. Alzado y sección en perspectiva del edificio satélite

Es obvio, por los niveles generales de acabado y mano de obra, que el presupuesto para la construcción del edificio satélite era mucho más ajustado que para el vestíbulo principal. El habitual método de desarrollo de diseño Foster riguroso fue reemplazado por un procedimiento de diseño de subcontratación y especificación de rendimiento más económico.



Imagen 03.52. Vista interior del edificio satélite

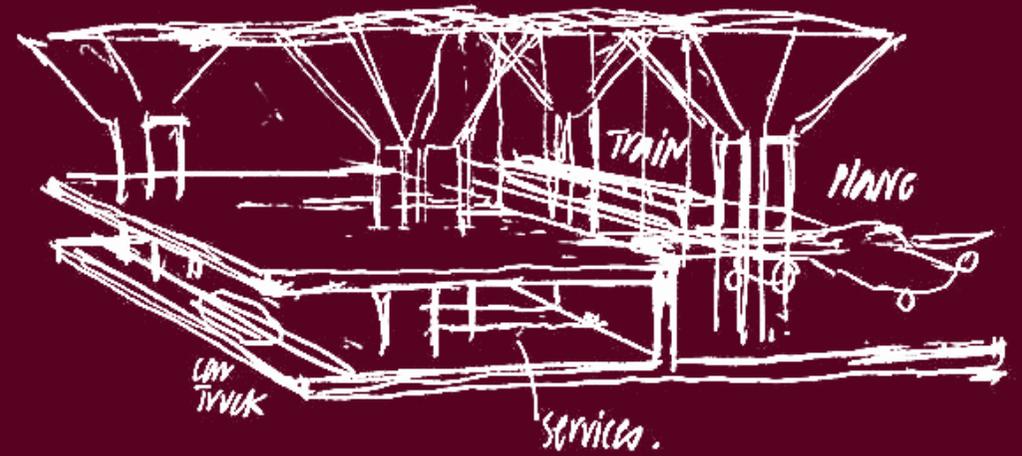


Imagen 03.53. Lucernario

Como ejemplo de esto, el revestimiento de los pisos inferiores es de plancha metálica perfilada de calidad industrial ordinaria y el salón de salida está acristalado en un sistema de muros cortina sin fijación.

El vidrio en sí, al contrario, no es ordinario. Es un laminado complicado con un alto coeficiente de protección para evitar la ganancia de calor solar y un nivel de aislamiento acústico cuidadosamente calibrado - lo suficientemente alto como para evitar el ruido intrusivo, pero lo suficientemente bajo para permitir que los motores de los aviones sean escuchados, puesto que se tiene la idea de que la orientación del pasajero depende de oír los aviones y verlos.

Los techos son bastante decepcionantes. Grandes superficies metálicas perforadas ininterrumpidas han sobrecargado el espacio y el nivel de precisión está muy por debajo de los estándares de Foster.



04. LA ESTRUCTURA

04.01 | DESCRIPCIÓN GENERAL

El Aeropuerto de Stansted supone para Norman Foster la búsqueda de una solución constructiva y estructural que dé como resultado la unión entre arquitectura, tecnología y naturaleza, encontrándola con un acierto exquisito.

La forma que propone Foster supone una analogía directa con la estructura de los árboles: un entramado formado por un tronco del que nacen unas ramas, las cuales a su vez dan forma a la copa, de manera que es capaz de autosustentarse y dar cobijo y a quien lo necesite bajo él.

Así, Foster es capaz de materializar sus ideas y las sensaciones que pretendía encontrar para la nueva terminal desde el arranque del proyecto.

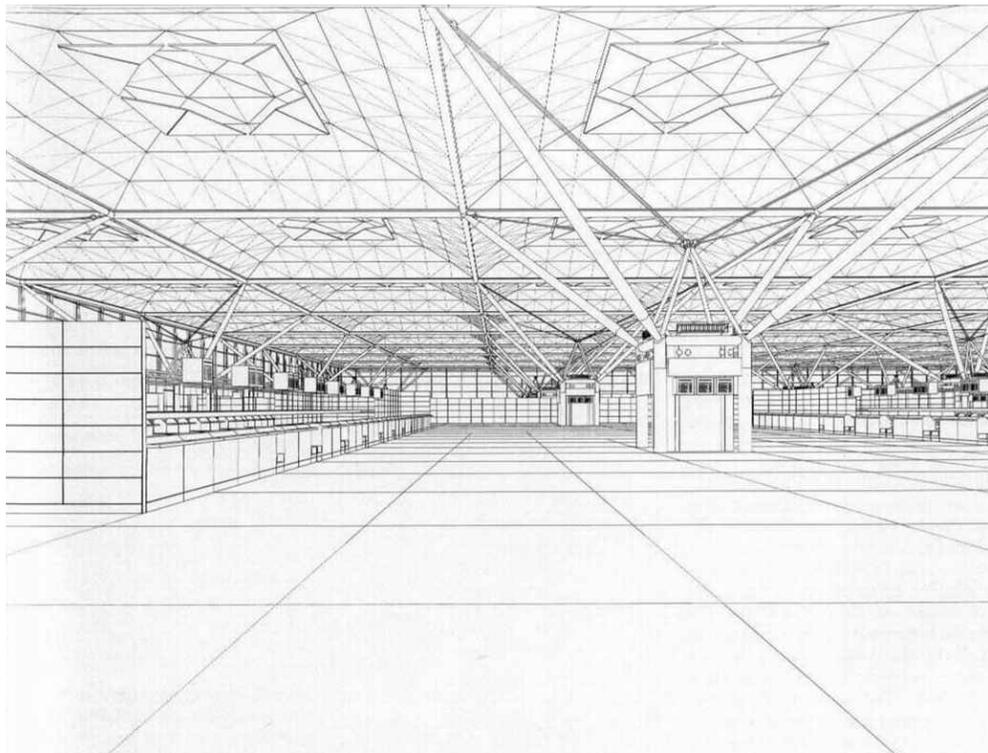


Imagen 04.01. Dibujo del interior de la terminal

Una vez estudiados a modo general todos los elementos que componen el proyecto, se deben establecer con profundidad cuáles son los elementos estructurales que encontramos y cómo éstos trabajan para que el edificio sea capaz de funcionar sin ningún tipo de problema teniendo en cuenta la idea de los grandes espacios libres que Foster plantea en su visión de los nuevos aeropuertos y las grandes naves.

Con el exhaustivo estudio previo, la estructura global de la terminal de la aeropuerto de Stansted que Foster proyecta se presenta desde un primer momento como una dualidad entre dos sistemas constructivos y estructurales claramente diferenciados: el árbol estructural y el forjado que separa el vestíbulo del sótano.



Imagen 04.02. Dualidad constructiva y estructural

04.02 | EL ÁRBOL ESTRUCTURAL

04.02.01 | ANÁLISIS DETALLADO

Foster plantea la estructura principal de la nueva terminal mediante elementos de acero. Así, mediante el uso de perfiles tubulares huecos consigue levantar su mejor obra de la década de los setenta.

Cabe mencionar que las dimensiones de los elementos estructurales que se describen a continuación se han obtenido mediante la medición en plano ya que no se ha encontrado su definición estructural de forma explícita.

El tronco está formado por cuatro soportes de 50 centímetros de diámetro, los cuales ascienden desde la cimentación de zapatas aisladas una altura de 17 metros. Para mantener la rigidez entre ellos y que todos trabajen conjuntamente con la finalidad de reducir su deformación, Foster coloca perfiles del mismo diámetro en sentido horizontal formando un cuadrado, soldados entre ellos. En la coronación de cada elemento vertical y mediante una unión atornillada, que permite el giro respecto de los soportes, nace cada una de las ramas que sustentan la cubierta, las cuales se encuentran materializadas mediante un perfil de sección de 40 centímetros de diámetro.

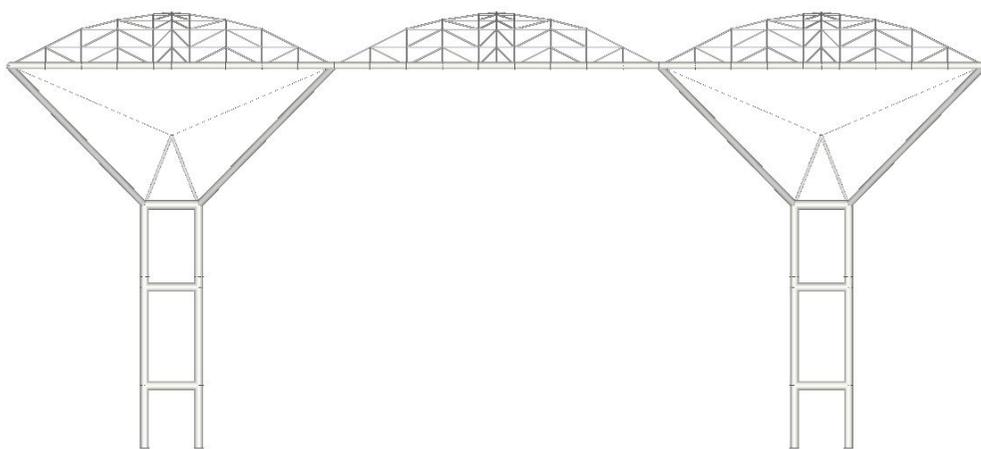


Imagen 04.03. Modelo 3D | Alzado de la estructura metálica

Para mantenerse rígida la estructura y reducir la deformación de las ramas no deformen por la acción del peso de la cubierta, Foster plantea su arriostramiento mediante 4 tirantes de acero dobles, los cuales se unen en un punto que, visto en planta, consiste en el centro geométrico del tronco cuadrado y se ubica a 3,80 metros de la altura de coronación de los soportes.

Para que este sistema de tirantes trabaje de manera correcta, transmiten sus esfuerzos a cuatro perfiles de 15 centímetros de diámetro que, formando una pirámide, se unen mediante soldadura (nudo rígido) a la coronación de los elementos que forman el tronco estructural.



Imagen 04.04. Detalle de la unión de los tirantes



Imagen 04.05. Árbol estructural

La cubierta se resuelve mediante una cúpula triangulada (con barras dispuestas en una sola capa) formada por perfiles tubulares de 10 centímetros de diámetro que soportan los paneles ligeros metálicos con aislamiento y los lucernarios. Las cargas que se producen en la cubierta se transmiten a una rejilla ortogonal formada por vigas materializadas con perfiles tubulares de 40 centímetros de diámetro, los cuales descansan sobre las cuatro ramas del árbol.

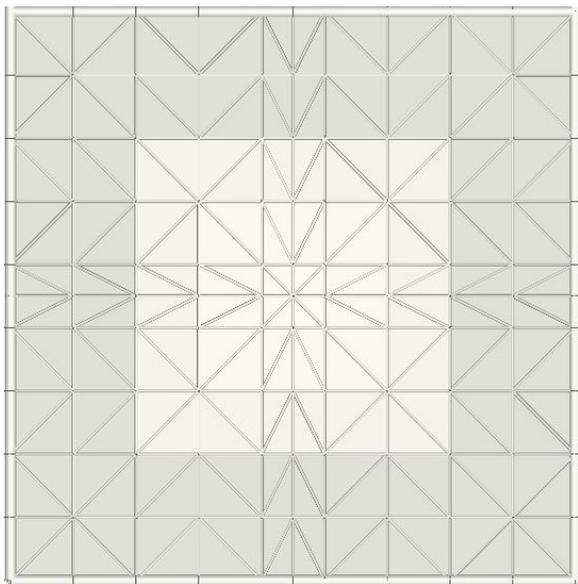


Imagen 04.06. Modelo 3D | Detalle de la cubierta

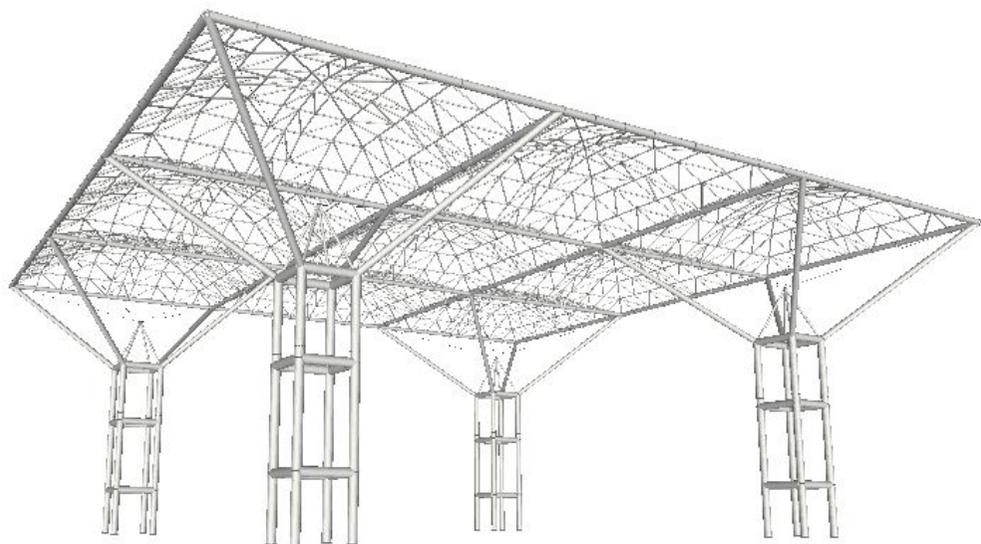


Imagen 04.07. Modelo 3D | Sistema arbóreo estructural

La transmisión de cargas desde la cubierta hasta la cimentación es clara, trabajando todos los elementos a compresión menos los tirantes los cuales, debido a su diámetros y disposición se entiende a primera vista que trabajan a tracción, como se muestra en la siguiente imagen [imagen 04.08].

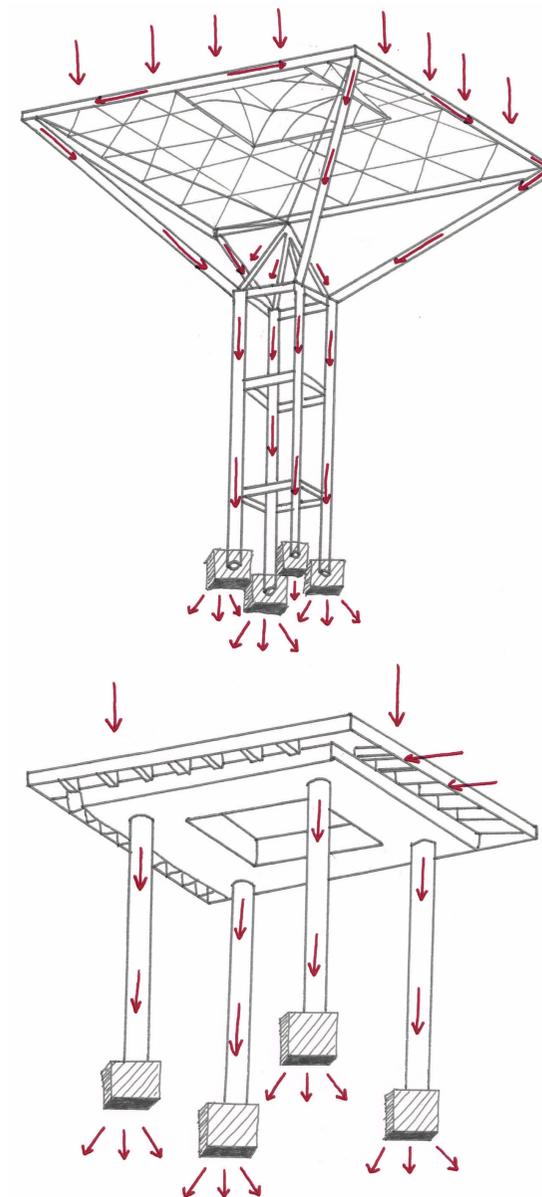


Imagen 04.08. Transmisión de cargas

04.02.02 | MODELIZACIÓN

Una vez estudiada la estructura en detalle, su métrica y su disposición, se emplea el software informático Architrave para calcular la validez de todos los elementos. Sin embargo, debido a la grandiosidad de la estructura y a su complejidad, se llevan a cabo una serie de simplificaciones para facilitar el cálculo y su comprobación.

Gracias a la amplia biblioteca de secciones y materiales que facilita Architrave, ésta va a ser usada para el dimensionado de todos los elementos estructurales posibles.

Para los árboles estructurales se mantiene el uso de elementos tubulares huecos de acero, considerando en un primer momento el acero S-275.

La totalidad de las barras, tanto verticales como horizontales, que componen el tronco del árbol se dimensionan con un perfil PH0UNE1c 508x8, para aproximarse la medida inicial de 500 milímetros de diámetro.

Por lo que respecta a las ramas estructurales así como a la rejilla ortogonal que sustenta la cubierta, todos los elementos se dimensionan con un perfil PH0UNE1c 406,4x8, suficientemente aproximado al dimensionado inicial de 400 milímetros de diámetro.

Las barras encargadas de conectar los tirantes con los soportes se llevan a cabo con un perfil PH0UNE1c 168,3x8, por lo que los 150 milímetros de diámetro que se les plantea en un primer momento están cumplidos. Así mismo, los tirantes se simplifican, pasando de dos tirantes de 7,5 milímetros de diámetro a un simple tirante de 15 milímetros con un acero Y1860.

Por último, la superficie triangular que conforma la cubierta está resuelta mediante perfiles PH0UNE1c 101,6x8.

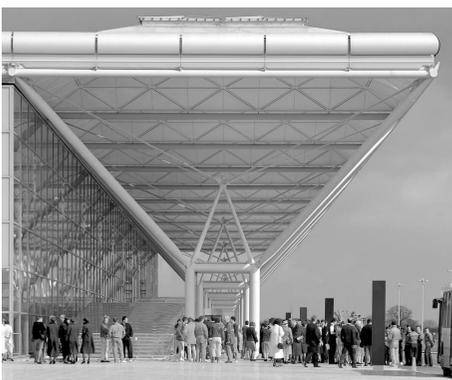


Imagen 04.09. Estructura real

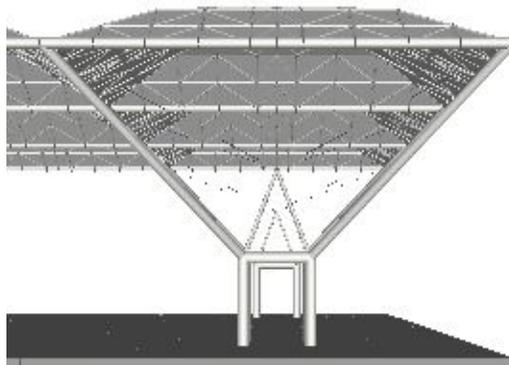


Imagen 04.10. Estructura virtual



Imagen 04.11. Vista interior del vestíbulo

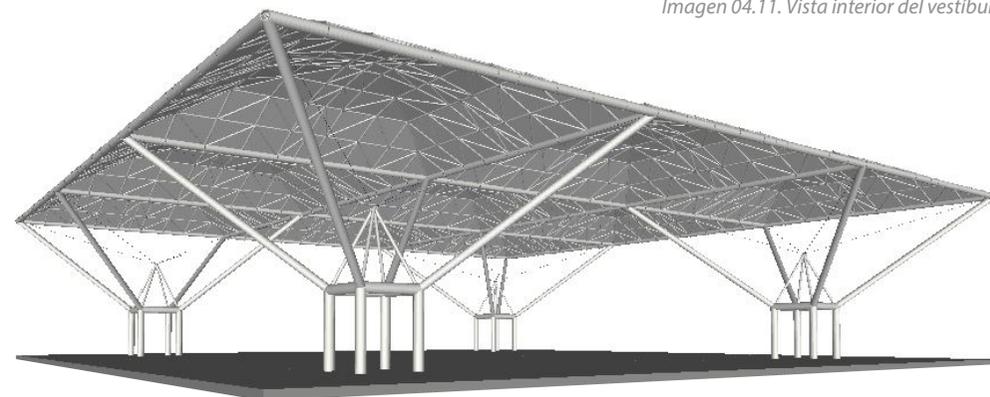


Imagen 04.12. Modelo 3D | Cubierta y ramas

04.03 | EL FORJADO DEL VESTÍBULO

04.03.01 | ANÁLISIS DETALLADO

Una de las características más singulares de este proyecto radica en que, como se ha explicado anteriormente, primero se llevó a cabo el sistema estructural de los árboles y la cubierta debido a que por las inclemencias del tiempo inglés y a la magnitud del proyecto, recordando que el proyecto inicial se suponía en una superficie de 50.000 m², se precisaba la necesidad de salvaguardar el hormigonado y endurecimiento del forjado. También es importante mencionar en este punto que debido a esta singularidad, el forjado de hormigón trabaja de manera independiente a la estructura metálica, dando flexibilidad a los movimientos de ambos. Así, se consiguió mantener segura la segunda fase de obra y que el hormigón fraguara en las mejores condiciones posibles.

Por lo que respecta a su tipología estructural, el forjado del vestíbulo consiste en un forjado reticular aligerado con casetones recuperables de 85 centímetros de canto en toda la extensión del proyecto. Este forjado se sustenta mediante pilares circulares de hormigón de 1,20 metros de diámetro, situados cada 6 o 12 metros, dependiendo de la métrica y de si se encuentran entre las franjas donde se ubican los árboles estructurales o no, como se puede apreciar en la planimetría del sótano [imagen 04.14.].

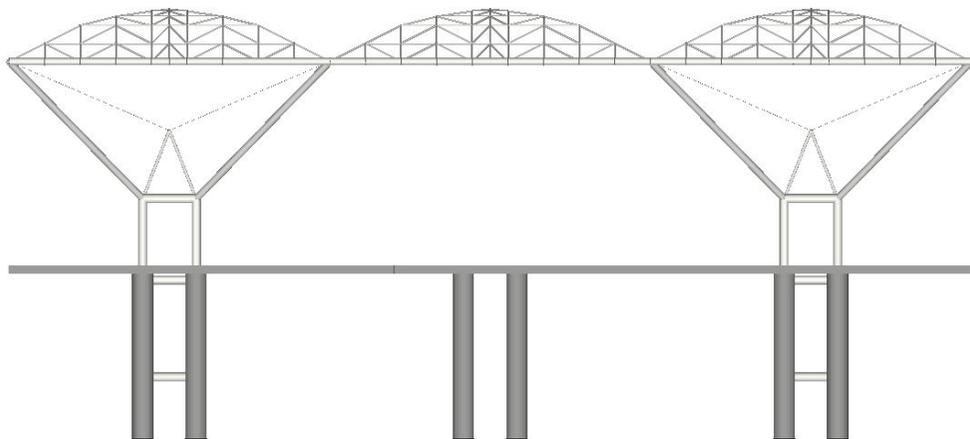


Imagen 04.13. Modelo 3D | Alzado de los dos tipos de estructura

Como se puede observar en los planos y debido a la independencia entre los dos elementos estructurales claramente diferenciados, Foster coloca pilares alrededor de los árboles estructurales, siguiendo los ejes diagonales que unen el centro geométrico del árbol con cada soporte metálico, a razón de 1,50 metros de distancia.

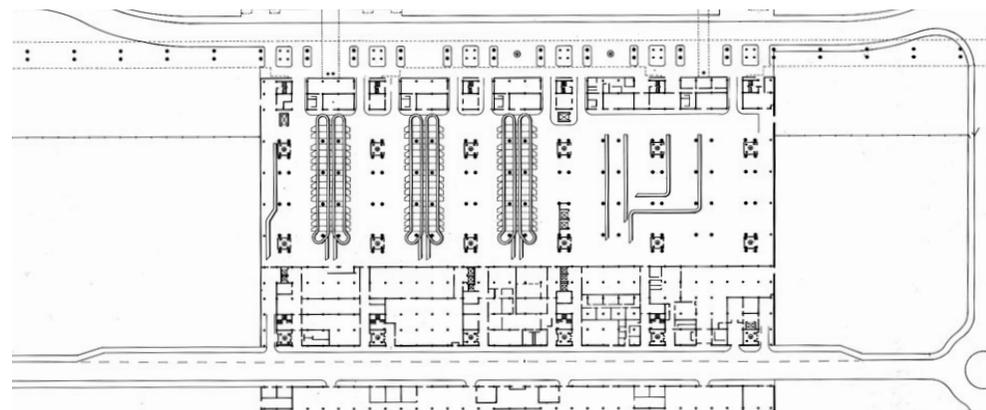


Imagen 04.14. Planta sótano

04.03.02 | MODELIZACIÓN

El forjado, como se ha comentado en el apartado anterior, consiste en un forjado reticular aligerado. Sin embargo, debido a la gran complejidad que supone el cálculo de este tipo de forjado en el programa Architrave, éste debe simplificarse. Para ello se realiza la similitud entre una losa aligerada y una losa maciza de inercia y peso equivalente, lo que supone que mediante el método de elementos finitos se pueda realizar la comprobación de una manera satisfactoria y coherente con la realidad del proyecto.

El método de elementos finitos es un método numérico general, aproximado pero muy preciso, para resolver ecuaciones diferenciales parciales. El método supone dividir un elemento estructural de grandes dimensiones en muchos elementos de menor tamaño interconectados entre ellos. Cada subdivisión supone un elemento finito al que se le asignan unas condicio-

nes de contorno, unas ecuaciones de equilibrio y unas ecuaciones constitutivas (tensión-deformación).

Se debe tener en cuenta que cuanto menor sea el tamaño del elemento, mejor será la precisión del resultado. Architrave tiene capacidad para resolver este sistema de ecuaciones para cada elemento, mostrando los resultados globales de la estructura.

De esta manera, se genera una losa maciza de un canto constante de 45 centímetros en sustitución del forjado aligerado real de 85 centímetros. La equivalencia de rigideces entre ambos sistemas estructurales permite obtener las deformaciones elásticas que se producirían en el forjado reticular. El material que se dispone en un primer momento para la comprobación de los resultados es un hormigón armado HA-25.

Esta simplificación de transformar el forjado reticular aligerado en una losa maciza implica una simplificación del modelo pues el peso propio de esta losa maciza supone un peso mayor al del forjado real más los pesos propios de los elementos constructivos tales como pavimentos y tabiquerías, lo que supone que no debemos añadir ninguna carga adicional al forjado en el modelo.

Por último, se modifica la posición de los pilares de hormigón, disponiéndolos en las líneas ficticias que unen todos los soportes metálicos.

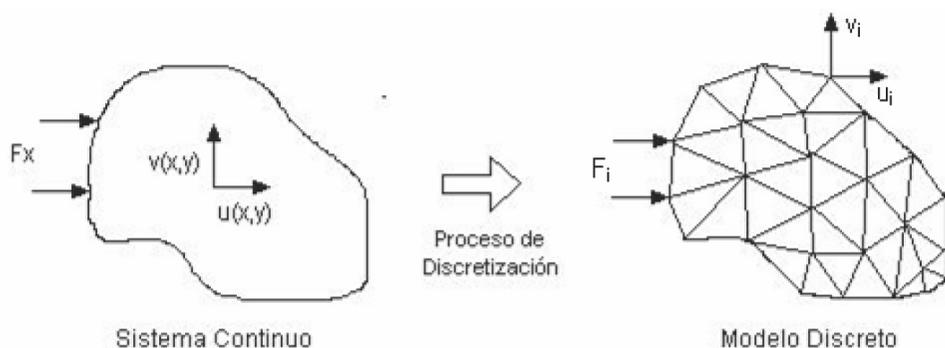


Imagen 04.15. Discretización de una geometría real a una modelización de elementos finitos

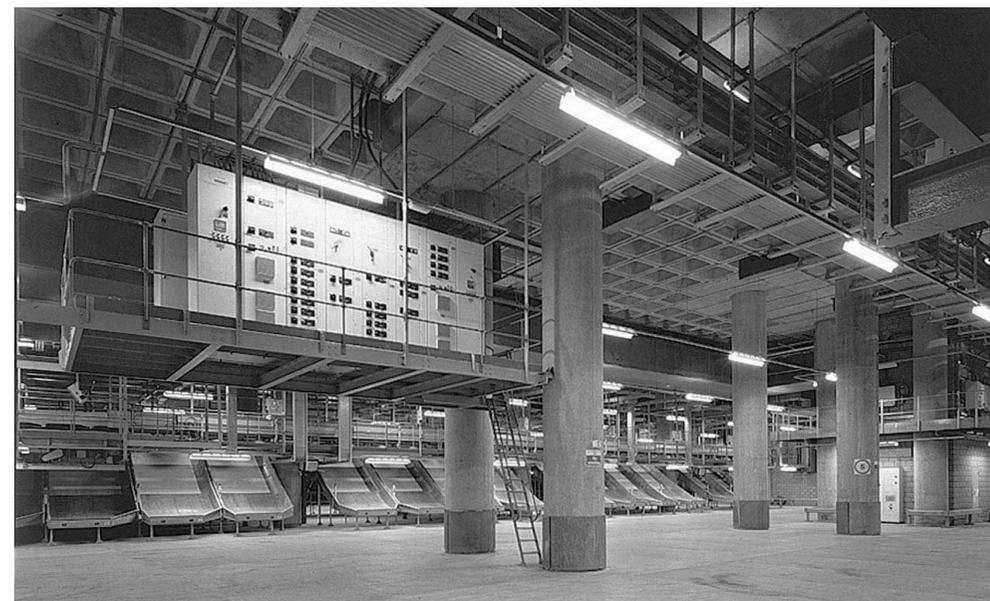


Imagen 04.16. Vista interior del sótano

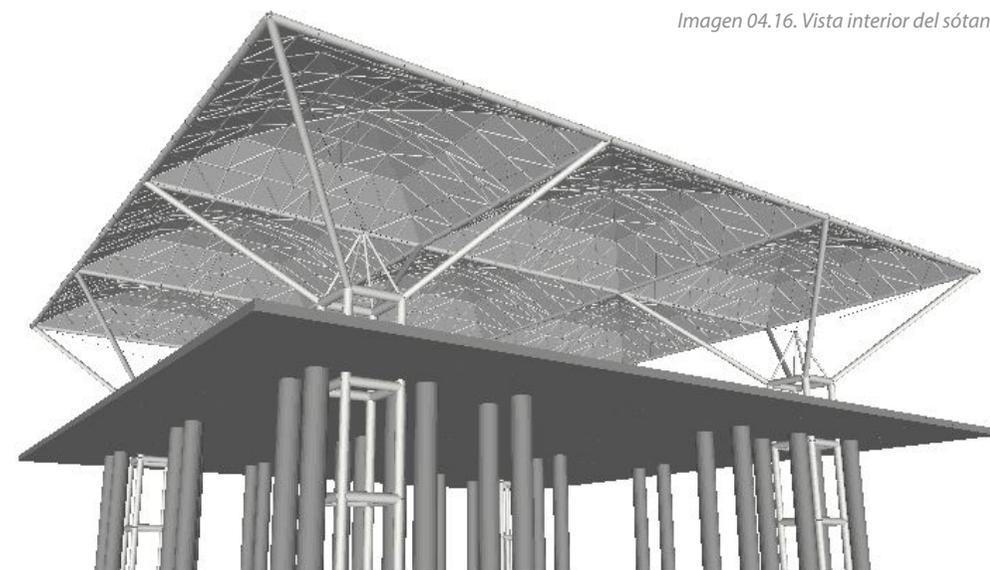


Imagen 04.17. Modelo 3D | Vista interior del sótano

04.04 | ASIGNACIÓN DE CARGAS

Para la asignación de las cargas que trabajarán sobre la estructura del Aeropuerto de Stansted se seguirán las pautas establecidas en el CTE (Código Técnico de la Edificación), más concretamente en el “DB SE-AE: Documento Básico de Seguridad Estructural-Acciones en la Edificación”. Este documento establece tres tipos de cargas:

- 01 | Cargas permanentes
- 02 | Cargas variables
- 03 | Cargas accidentales

Sin embargo, solo se tendrán en cuenta los dos primeros tipos, despreciando el último, el cual atañe al sismo y al incendio, debido a la gran envergadura del proyecto y a que solamente se van a realizar los cálculos para un módulo de cuatro árboles estructurales.

04.04.01 | CARGAS PERMANENTES

Las cargas permanentes son básicamente las formadas por el peso propio de la estructura y de los elementos constructivos, como pueden ser pavimentos, tabiquería, cerramientos, falsos techos, instalaciones, etc, además del posible mobiliario y la maquinaria fija.

Es de importancia mencionar que el software utilizado para el análisis, Architrave, tiene en cuenta el peso del material al indicar el tipo de hormigón o de acero y sus espesores o sus dimensiones.

Por este motivo, no es necesario insertar de manera externa las cargas correspondientes al peso propio de los elementos estructurales, puesto que esto añadiría al proyecto una carga adicional, aunque si que se desarrollarán en este apartado.

Los pesos propios de los diferentes elementos se obtienen del “Anejo C. Prontuario de pesos y coeficientes de rozamiento interno” del DB-SE-AE del CTE.

Elemento	Peso
Forjados	kN / m ²
Chapa grecada con capa de hormigón; grueso total < 0,12 m	2
Forjado unidireccional, luces de hasta 5 m; grueso total < 0,28 m	3
Forjado uni o bidireccional; grueso total < 0,30 m	4
Forjado bidireccional, grueso total < 0,35 m	5
Losa maciza de hormigón, grueso total 0,20 m	5
Cerramientos y particiones (para una altura libre del orden de 3,0 m) incluso enlucido	kN / m
Tablero o tabique simple; grueso total < 0,09 m	3
Tabicón u hoja simple de albañilería; grueso total < 0,14 m	5
Hoja de albañilería exterior y tabique interior; grueso total < 0,25 m	7
Solados (incluyendo material de agarre)	kN / m ²
Lámina pegada o moqueta; grueso total < 0,03 m	0,5
Pavimento de madera, cerámico o hidráulico sobre plastón; grueso total < 0,08 m	1,0
Placas de piedra, o peldañeo; grueso total < 0,15 m	1,5
Cubierta, sobre forjado (peso en proyección horizontal)	kN / m ²
Faldones de chapa, tablero o paneles ligeros	1,0
Faldones de placas, teja o pizarra	2,0
Faldones de teja sobre tableros y tabiques palomeros	3,0
Cubierta plana, recrecido, con impermeabilización vista protegida	1,5
Cubierta plana, a la catalana o invertida con acabado de grava	2,5
Rellenos	kN / m ³
Agua en aljibes o piscinas	10
Terreno, como en jardineras, incluyendo material de drenaje ⁽¹⁾	20

⁽¹⁾ El peso total debe tener en cuenta la posible desviación de grueso respecto a lo indicado en planos.

Imagen 04.18. Tabla C.5. Peso propio de elementos constructivos

04.04.01.01 | Planta vestíbulo

01 | Forjado reticular aligerado de hormigón armado de 85 cm de canto
8,00 kN/m²

02 | Pavimento de granito gris | **1,5 kN/m²**

03 | Tabiquería | **1,00 kN/m²**

Carga superficial repartida a lo largo de todo el forjado debido a que las cabinas del vestíbulo se plantean como móviles según las necesidades.

04 | Doble acristalamiento incluyendo la carpintería | 0,50 kN/m²
0,50 kN/m² x 12 m = **6 kN/ml**

CARGA PERMANENTE TOTAL | $G_k = 8,00 + 1,50 + 1,00 = 10,50 \text{ kN/m}^2$

Sin embargo, como se ha explicado con anterioridad, para el cálculo mediante el modelo informático, el forjado reticular desde convertirse en una losa maciza de inercia y peso equivalente. Así, se considera como equivalente una losa maciza de 45 cm de canto con un HA-25 de manera que:

$$25 \text{ kN/m}^3 \times 0,45 \text{ m} = 11,25 \text{ kN/m}^2$$

De esta manera, observamos que la carga del peso propio de la losa maciza es superior a la suma de cargas permanentes superficiales en el caso del forjado reticular de casetones, de manera que no es necesario introducir ninguna carga adicional al forjado en el programa informático.

04.04.01.02 | Cubierta

01 | Panelado triangular con aislamiento | 1 kN/m^2

04.04.02 | CARGAS VARIABLES

Las cargas variables son aquellas que no tienen un carácter permanente, es decir, actúan únicamente durante un período de tiempo. Además, cabe mencionar que el valor de la carga en el momento que se aplica puede no ser constante.

Se establecen como cargas variables más significativas la sobrecarga de uso, la sobrecarga de nieve y la carga de viento.

04.04.02.01 | Sobrecargas de uso

Para las diferentes sobrecargas de uso se debe consultar la tabla "3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso" del DB-SE-AE del CTE.

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m ²]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 ⁽¹⁾
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente ⁽²⁾			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación ⁽³⁾	G1 ⁽⁷⁾	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 ⁽⁴⁾ ⁽⁵⁾	2
		G2	Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) ⁽⁵⁾	0,4 ⁽⁴⁾	1
				0	2

Imagen 04.19. Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso

Así pues, las sobrecargas de uso quedan resumidas de la siguiente manera:

01 | CUBIERTA | Cubierta accesible únicamente para conservación (Uso G1)
1 kN/m²

02 | PLANTA VESTÍBULO | Zona de acceso al público (Uso C3) | **5 kN/m²**

04.04.02.02 | Sobrecargas de nieve

No se va a tener en cuenta la sobrecarga de nieve por la complejidad que supone para el análisis, debido a la gran cantidad de elementos que componen la cubierta, considerando la posibilidad de un futuro estudio independiente teniendo en cuenta esta variable ya que nos encontramos cercanos a Londres y esta sobrecarga podría no ser despreciable

04.04.02.03 | Carga de viento

La carga de viento se tendrá en cuenta en el análisis del módulo formado por cuatro árboles estructurales.

Debemos trasladarnos al apartado "3.3.2 Acción del viento" del DB-SE-AE del CTE para establecer el cálculo de la carga del viento, la cual se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p$$

Siendo:

q_b | Presión dinámica del viento

c_e | Coeficiente de exposición, variable con la altura y en función del grado de aspereza del entorno

c_p | Coeficiente eólico o de presión, dependiente de la forma y orientación de la superficie respecto al viento

04.04.02.03.01 | Cálculo de la presión dinámica de viento (q_b)

De forma simplificada se pueda adoptar como valor 0,50 kN/m² en cualquier punto del territorio español. Para ser más precisos se puede obtener mediante el anejo D.

Si el edificio a analizar no se encuentra en España se puede estudiar su emplazamiento, altitud, temperaturas máximas y mínimas, dirección del viento, etc, con la finalidad de adoptar los valores de la ciudad española de referencia para nuestro cálculo.

- El valor básico de la velocidad del viento en cada localidad puede obtenerse del mapa de la figura D.1. El de la presión dinámica es, respectivamente de 0,42 kN/m², 0,45 kN/m² y 0,52 kN/m² para las zonas A, B y C de dicho mapa.



Imagen 04.20. Figura D.1. Valor básico de la velocidad del viento (V_b)

04.04.02.03.02 | Cálculo del coeficiente de exposición (c_e)

Se determina con lo establecido en el apartado "3.3.3. Coeficiente de exposición" mediante la tabla "3.4. Valores del coeficiente de exposición c_e ". En edificios urbanos de hasta 8 plantas se puede tomar un valor constante de 2,00.

Grado de aspereza del entorno	Altura del punto considerado (m)							
	3	6	9	12	15	18	24	30
I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	2,4	2,7	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,7
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	2,1	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5
III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	1,6	2,0	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1
IV Zona urbana en general, industrial o forestal	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6
V Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,6	1,9	2,0

Imagen 04.21. Tabla 3.4. Valores del coeficiente de exposición (c_e)

04.04.02.03.03 | Cálculo del coeficiente eólico o de presión (c_p)

Su valor se establece en los apartados “3.3.4. Coeficiente eólico de edificios de pisos”, mediante la tabla “3.5. Coeficiente eólico de edificios de pisos”, y “3.3.5. Coeficiente eólico de naves y construcciones diáfanas”, a través de la tabla “3.6. Coeficientes de presión interior”.

	Esbeltez en el plano paralelo al viento					
	< 0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	≥ 5,00
Coeficiente eólico de presión, c_p	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
Coeficiente eólico de succión, c_s	-0,3	-0,4	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7

Imagen 04.22. Tabla 3.5. Coeficiente eólico en edificios de pisos

Esbeltez en el plano paralelo al viento	Área de huecos en zonas de succión respecto al área total de huecos del edificio											
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
≤1	0,7	0,7	0,6	0,4	0,3	0,1	0,0	-0,1	-0,3	-0,4	-0,5	
≥4	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	

Imagen 04.23. Tabla 3.6. Coeficientes de presión interior

04.04.02.03.04 | Determinación de la carga de viento para el Aeropuerto de Stansted

Los pasos anteriores deberían ser los que tomáramos para determinar la carga de viento que debemos establecer en el edificio analizar.

Sin embargo, y para simplificar las operaciones, cogeremos una carga de 1,4 kN/m², dato extraído del artículo “How it was Built” de la revista “The Architectural Review” de mayo de 1991, el cual expone que es esa carga de viento con la que se realizaron los cálculos del proyecto.

04.05 | COMBINACIONES DE CARGAS

Para la correcta aplicación de las cargas calculadas en el apartado anterior se debe llevar a cabo la combinación de cargas, tal y como establece el CTE (Código Técnico de la Edificación), más concretamente en el DB-SE, en el apartado "4. Verificaciones basadas en coeficientes parciales", en el punto "4.2.2. Combinación de acciones" para las combinaciones ELU y en el punto "4.3.2. Combinación de acciones" para las combinaciones ELS tal que:

4.2.2 Combinación de acciones

- 1 El valor de cálculo de los efectos de las acciones correspondiente a una situación persistente o transitoria, se determina mediante combinaciones de acciones a partir de la expresión

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.3)$$

es decir, considerando la actuación simultánea de:

- a) todas las acciones permanentes, en valor de cálculo ($\gamma_G \cdot G_k$), incluido el pretensado ($\gamma_P \cdot P$);
- b) una acción variable cualquiera, en valor de cálculo ($\gamma_Q \cdot Q_k$), debiendo adoptarse como tal una tras otra sucesivamente en distintos análisis;
- c) el resto de las acciones variables, en valor de cálculo de combinación ($\gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot Q_k$).

Los valores de los coeficientes de seguridad, γ , se establecen en la tabla 4.1 para cada tipo de acción, atendiendo para comprobaciones de resistencia a si su efecto es desfavorable o favorable, considerada globalmente.

Para comprobaciones de estabilidad, se diferenciará, aun dentro de la misma acción, la parte favorable (la estabilizadora), de la desfavorable (la desestabilizadora).

Los valores de los coeficientes de simultaneidad, ψ , se establecen en la tabla 4.2

- 2 El valor de cálculo de los efectos de las acciones correspondiente a una situación extraordinaria, se determina mediante combinaciones de acciones a partir de la expresión

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + A_d + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.4)$$

es decir, considerando la actuación simultánea de:

- a) todas las acciones permanentes, en valor de cálculo ($\gamma_G \cdot G_k$), incluido el pretensado ($\gamma_P \cdot P$);
- b) una acción accidental cualquiera, en valor de cálculo (A_d), debiendo analizarse sucesivamente con cada una de ellas.
- c) una acción variable, en valor de cálculo frecuente ($\gamma_Q \cdot \psi_1 \cdot Q_k$), debiendo adoptarse como tal, una tras otra sucesivamente en distintos análisis con cada acción accidental considerada.
- d) El resto de las acciones variables, en valor de cálculo casi permanente ($\gamma_Q \cdot \psi_2 \cdot Q_k$).

En situación extraordinaria, todos los coeficientes de seguridad ($\gamma_G, \gamma_P, \gamma_Q$), son iguales a cero si su efecto es favorable, o a la unidad si es desfavorable, en los términos anteriores.

- 3 En los casos en los que la acción accidental sea la acción sísmica, todas las acciones variables concomitantes se tendrán en cuenta con su valor casi permanente, según la expresión

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.5)$$

4.3.2 Combinación de acciones

- 1 Para cada situación de dimensionado y criterio considerado, los efectos de las acciones se determinarán a partir de la correspondiente combinación de acciones e influencias simultáneas, de acuerdo con los criterios que se establecen a continuación.
- 2 Los efectos debidos a las acciones de corta duración que pueden resultar irreversibles, se determinan mediante combinaciones de acciones, del tipo denominado característica, a partir de la expresión

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.6)$$

Es decir, considerando la actuación simultánea de:

- a) todas las acciones permanentes, en valor característico (G_k);
 - b) una acción variable cualquiera, en valor característico (Q_k), debiendo adoptarse como tal una tras otra sucesivamente en distintos análisis;
 - c) el resto de las acciones variables, en valor de combinación ($\psi_0 \cdot Q_k$).
- 3 Los efectos debidos a las acciones de corta duración que pueden resultar reversibles, se determinan mediante combinaciones de acciones, del tipo denominado frecuente, a partir de la expresión

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.7)$$

siendo

Es decir, considerando la actuación simultánea de:

- a) todas las acciones permanentes, en valor característico (G_k);
 - b) una acción variable cualquiera, en valor frecuente ($\psi_1 \cdot Q_k$), debiendo adoptarse como tal una tras otra sucesivamente en distintos análisis;
 - c) el resto de las acciones variables, en valor casi permanente ($\psi_2 \cdot Q_k$).
- 4 Los efectos debidos a las acciones de larga duración, se determinan mediante combinaciones de acciones, del tipo denominado casi permanente, a partir de la expresión

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.8)$$

siendo:

- a) todas las acciones permanentes, en valor característico (G_k);
- b) todas las acciones variables, en valor casi permanente ($\psi_2 \cdot Q_k$).

Imagen 04.25. Apartado 4.3.2. del CTE DB-SE

En la siguiente tabla se muestran los coeficientes de seguridad para las acciones en la edificación, siendo estos coeficientes los aplicados para mayorar las cargas y aumentar la seguridad, tal como indica el CTE.

En este caso, se utilizarán los coeficientes correspondientes a situaciones desfavorables, siendo:

Tipo de verificación ⁽¹⁾	Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
		desfavorable	favorable
Resistencia	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,35	0,80
	Empuje del terreno	1,35	0,70
	Presión del agua	1,20	0,90
	Variable	1,50	0
		desestabilizadora	estabilizadora
Estabilidad	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,10	0,90
	Empuje del terreno	1,35	0,80
	Presión del agua	1,05	0,95
	Variable	1,50	0

⁽¹⁾ Los coeficientes correspondientes a la verificación de la resistencia del terreno se establecen en el DB-SE-C

Imagen 04.26. Tabla 4.1. Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones

De la misma manera, se deben establecer los coeficientes de simultaneidad pertinentes a las cargas variables.

	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga superficial de uso (Categorías según DB-SE-AE)			
• Zonas residenciales (Categoría A)	0,7	0,5	0,3
• Zonas administrativas (Categoría B)	0,7	0,5	0,3
• Zonas destinadas al público (Categoría C)	0,7	0,7	0,6
• Zonas comerciales (Categoría D)	0,7	0,7	0,6
• Zonas de tráfico y de aparcamiento de vehículos ligeros con un peso total inferior a 30 kN (Categoría E)	0,7	0,7	0,6
• Cubiertas transitables (Categoría F)		(1)	
• Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (Categoría G)	0	0	0
Nieve			
• para altitudes > 1000 m	0,7	0,5	0,2
• para altitudes ≤ 1000 m	0,5	0,2	0
Viento	0,6	0,5	0
Temperatura	0,6	0,5	0
Acciones variables del terreno	0,7	0,7	0,7

⁽¹⁾ En las cubiertas transitables, se adoptarán los valores correspondientes al uso desde el que se accede.

Imagen 04.27. Tabla 4.2. Coeficientes de simultaneidad (ψ)

Como ya habíamos establecido, la categoría de uso de la planta de vestíbulo se plantea como Categoría C (Zonas destinadas al público) mientras que para la cubierta, con anterioridad, habíamos establecido la Categoría G (Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento).

En resumen, los coeficientes de situaciones desfavorables son:

01 | CASO DE ACCIONES PERMANENTES | 1,35

02 | CASO DE ACCIONES VARIABLES | 1,50

En resumen, los coeficientes de simultaneidad adoptados para la sobrecarga de uso son los siguientes:

01 | PLANTA VESTÍBULO

$$\psi_0 = 0,70$$

$$\psi_1 = 0,70$$

$$\psi_2 = 0,60$$

02 | CUBIERTA

$$\psi_0 = 0$$

$$\psi_1 = 0$$

$$\psi_2 = 0$$

Debemos establecer los coeficientes de simultaneidad correspondientes a la carga de viento, siendo los siguientes:

$$\psi_0 = 0,60$$

$$\psi_1 = 0,50$$

$$\psi_2 = 0$$

En este caso, no se van a tener en cuenta los coeficientes de simultaneidad de nieve debido a que esta hipótesis no se ha considerado para el cálculo de las cargas.

04.05.01 | COMBINACIONES ESTADO LÍMITE ÚLTIMO (ELU)

Como se puede observar en la [Imagen 04.. Apartado 4.2.2. del CTE DB-SE], el valor de cálculo de los efectos de las acciones que corresponden a una situación persistente o transitoria se determina mediante combinaciones de acciones a partir de la siguiente expresión:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Así pues, observamos que debemos considerar simultáneamente las actuaciones de las siguientes acciones:

01 | La totalidad de las acciones permanentes, en valor de cálculo

$$\gamma_G \cdot G_k + \gamma_P \cdot P \text{ (pretensado)}$$

02 | La acción variable principal en cada caso, en valor de cálculo

$$\gamma_Q \cdot Q_k$$

03 | El resto de acciones variables, en valor de combinación

$$\gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot Q_k$$

04.05.01.01 | Combinación ELU 01: Acción variable principal USO

$$C.ELU_01 = 1,35 \cdot HIP01 + 1,50 \cdot HIP02 + 1,50 \cdot 0,60 \cdot HIP04$$

04.05.01.02 | Combinación ELU 02: Acción variable principal VIENTO

$$C.ELU_02 = 1,35 \cdot HIP01 + 1,50 \cdot HIP04 + 1,50 \cdot 0,70 \cdot HIP02$$

04.05.02 | COMBINACIONES ESTADO LÍMITE DE SERVICIO (ELS)

Como se puede observar en la [Imagen 04.. Apartado 4.3.2. del CTE DB-SE], se establecen tres tipos de combinaciones de acciones, en función de su reversabilidad y duración.

04.05.02.01 | Combinación ELS CARACTERÍSTICA

Los efectos de las acciones de corta duración irreversibles se determinan mediante combinaciones de acciones a partir de la siguiente expresión:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Se deben considerar simultáneamente las actuaciones de las siguientes acciones:

01 | La totalidad de las acciones permanentes, en valor característico | G_k

02 | La acción variable principal en cada caso, en valor característico | Q_k

03 | El resto de acciones variables, en valor de combinación | $\psi_0 \cdot Q_k$

04.05.02.01.01 | Combinación ELS 01: Acción variable principal USO

$$C.ELS_01 = HIP01 + HIP02 + 0,60 \cdot HIP04$$

04.05.02.01.02 | Combinación ELS 02: Acción variable principal VIENTO

$$C.ELS_02 = HIP01 + HIP04 + 0,70 \cdot HIP02$$

04.05.02.02 | Combinación ELS FRECUENTE

Los efectos de las acciones de corta duración reversibles se determinan mediante combinaciones de acciones a partir de la siguiente expresión:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

Se deben considerar simultáneamente las actuaciones de las siguientes acciones:

01 | La totalidad de las acciones permanentes, en valor característico | G_k

02 | La acción variable principal en cada caso, en valor frecuente | $\psi_1 \cdot Q_k$

03 | El resto de acciones variables, en valor casi permanente | $\psi_2 \cdot Q_k$

04.05.02.02.01 | Combinación ELS 03: Acción variable principal USO

$$C.ELS_03 = HIP01 + 0,70 \cdot HIP02 + 0 \cdot HIP04$$

04.05.02.01.02 | Combinación ELS 04: Acción variable principal VIENTO

$$C.ELS_04 = HIP01 + 0,50 \cdot HIP04 + 0,60 \cdot HIP02$$

04.05.02.03 | Combinación ELS CASI PERMANENTE

Los efectos de las acciones de corta duración reversibles se determinan mediante combinaciones de acciones a partir de la siguiente expresión:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

Se deben considerar simultáneamente las actuaciones de las siguientes acciones:

01 | La totalidad de las acciones permanentes, en valor característico | G_k

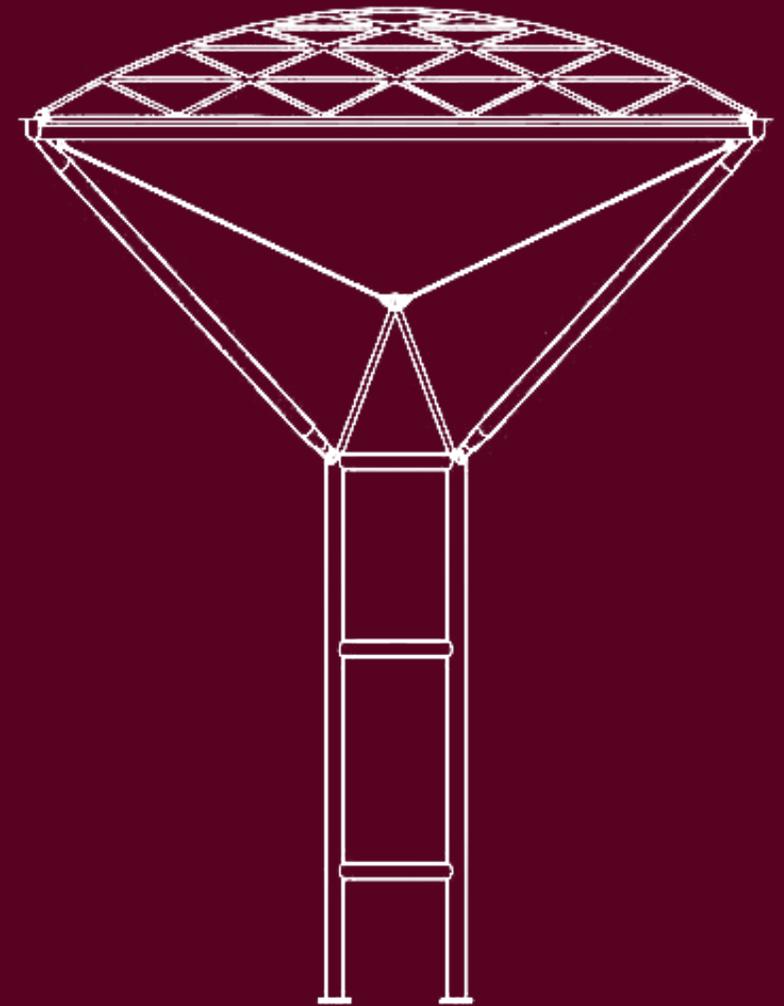
02 | La totalidad de las acciones variables, en valor cuasi permanente
 $\psi_2 \cdot Q_k$

04.05.02.03.01 | Combinación ELS 05: Acción variable principal USO

$$C.ELS_05 = HIP01 + 0,60 \cdot HIP02 + 0 \cdot HIP04$$

04.05.02.03.02 | Combinación ELS 06: Acción variable principal VIENTO

$$C.ELS_06 = HIP01 + 0 \cdot HIP04 + 0,60 \cdot HIP02$$



05. ANÁLISIS DE RESULTADOS

05.01 | DESCRIPCIÓN GENERAL

Modelizada informáticamente la estructura con las simplificaciones correspondientes y con la asignación de cargas completada, se procede a obtener los resultados pertinentes mediante el software informático Architrave. Gracias a esta aplicación se obtienen los valores de las tensiones, de los momentos flectores, axiles y cortantes, así como la deformación que se producirá en la estructura en las combinaciones de cargas que se precisen.

En la siguiente imagen [imagen 05.01] se muestra cómo deformará la estructura en su conjunto, pudiendo observar tanto la estructura metálica como la estructura de hormigón. Se puede observar como los elementos estructurales deforman más en los extremos. Debido a la grandiosidad del proyecto solo se ha tomado para el cálculo un modelo formado por 9 módulos, de los cuales los de los extremos corresponden a los árboles estructurales. No debe tenerse en cuenta pues esta deformación como verídica (en especial la del forjado de hormigón), debido a que en la estructura real los extremos presentes en la imagen tienen continuidad.

Así pues, se va a estudiar en un primer momento el dimensionado mediante las solicitaciones de una serie de barras y a continuación las deformaciones, primero un único módulo, correspondiente con el árbol estructural y después se realizarán las explicaciones y comprobaciones pertinentes al modelo de 9 módulos. De la misma manera, destacar que se van a estudiar por separado la estructura metálica de la estructura de hormigón, pues trabajan independientemente, como se ha explicado anteriormente.

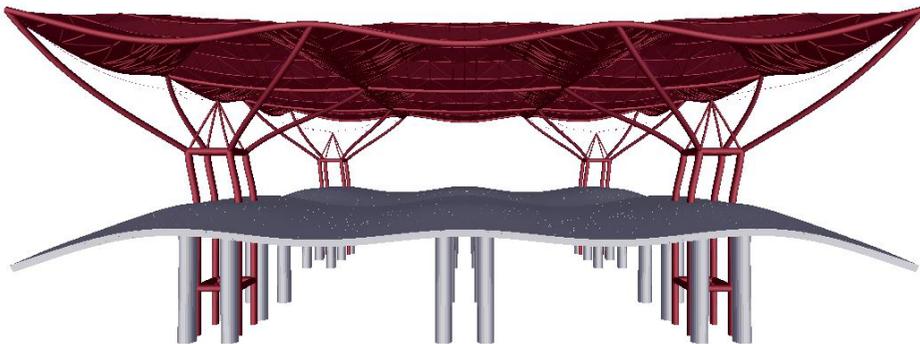


Imagen 05.01. Deformación del modelo sólido 3D

05.02 | SOLICITACIONES Y DIMENSIONADO

Por la complejidad del modelo y por el amplio número de elementos que presenta, se van a desarrollar las comprobaciones de un número determinado de barras como muestra del total, mostrando su comportamiento y la oportunidad del predimensionado adoptado, a través de las solicitaciones que, explicadas a continuación, pertenecen a la combinación ELU más desfavorable en cada caso y mediante las cuales se dimensionan los elementos.

05.02.01 | ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA METÁLICA

Para el caso de la estructura metálica se van a comprobar cuatro barras distintas, todas ellas dispuestas en el interior del modelo de nueve módulos pues reciben más cargas, debido a su ámbito de uso, que los elementos de los extremos exteriores.

05.02.01.01 | Barra diagonal de la cubierta

Se escoge esta barra debido a que recoge todas las cargas de la cubierta que se encuentran en su ámbito de uso y las transmite a la rama estructural. El axil máximo, como se observa en la [imagen 05.02], se encuentra cerca de la unión de esta barra con la rama del árbol con un valor de 205,379 kN. De la misma manera, se puede observar que la barra no está prácticamente solicitada a axil en la cumbre de la cubierta. Comprobados los axiles, la barra se dimensiona con un acero S-275 y se perita para su validación.

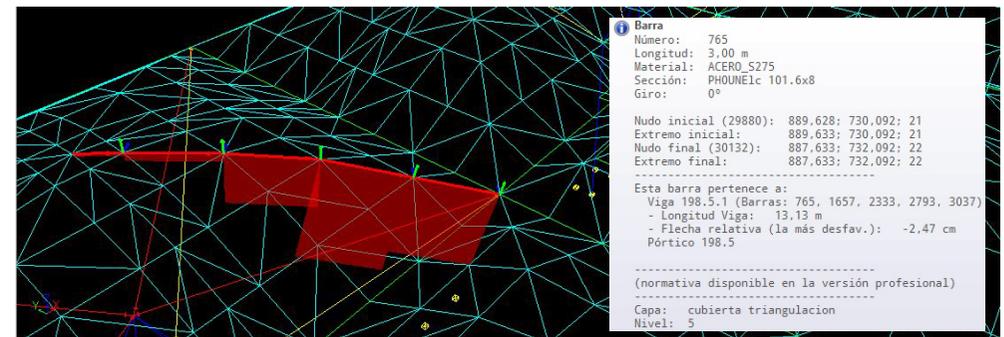


Imagen 05.02. Diagrama de axiles de la barra diagonal de la cubierta

Como se muestra en la imagen [imagen 05.03], la barra, aunque trabaja muy holgadamente a resistencia (coeficiente de resistencia = 0,39), falla a pandeo. Esto puede ser debido a que el software informático Architrave considera la longitud de pandeo desde el centro del módulo hasta su encuentro con la barra diagonal, no considerando que está arriostrada por las otras barras que conforman la cúpula triangulada.

Sección
 Tipo de sección: PH0UNElc 101.6x8
 Propiedades:
 Base: 10,15 cm
 Altura: 10,14 cm
 Área: 23,52 cm²
 Ix: 519,00 cm⁴
 Iy: 259,50 cm⁴
 Iz: 259,50 cm⁴

Pórtico de vigas
 Nombre del pórtico: 471.5
 Nº de vigas: 1
 Viga actual: 471.5.1
 Longitud viga (m): 13,13

Material
 Nombre: ACERO_S275
 Tipo Acero: S275
 Fyk: 275.000 Fu: 410.000

Comprobaciones
 Falla

Resistencia
 ELU desfavorable: 1
 Coeficiente Resistencia: 0,38
 Ten. Von Mises (N/mm²): 100,06
 Comprobaciones: Cumple

Pandeo
 ELU desfavorable: 1
 β Pandeo plano XY local: 1,00
 β Pandeo plano XZ local: 0,50
 Coeficiente Pandeo: 2,39
 Chi Z: 0,05
 Chi Y: 0,17
 Comprobaciones: Falla

Pandeo lateral
 ELU desfavorable:
 β Pandeo lateral: 0,00
 Coeficiente Pandeo lateral: 0,00
 Chi lateral: 1,00
 Comprobaciones: Cumple

Flecha
 ELS desfavorable: 1
 Flecha relativa (elástica) (cm): -0,945
 Flecha activa (cm): 0,378
 Coeficiente Flecha activa: 0,12
 Flecha instant. (cm): 0,331
 Coeficiente Flecha instantánea: 0,09
 Flecha casi-perm (cm): 0,708
 Coeficiente Flecha casi-permanente: 0,16
 Tipo de vano: Voladizo
 Flecha activa/L: 1/ 3,476
 Límite Flecha activa: 1/ 400
 Flecha instant./L: 1/ 3,973
 Límite Flecha instantánea: 1/ 350
 Flecha casi-perm/L: 1/ 1,854
 Límite Flecha casi-permanente: 1/ 300
 Comprobaciones: Cumple

Imagen 05.03. Fallo de la barra por pandeo

Para homogeneizar el conjunto de barras, se da como solución disponer el mismo tipo de sección que para los elementos que componen la pirámide que conecta los tirantes con la coronación de los soportes.

Sección
 Tipo de sección: PH0UNElc 168.3x8
 Propiedades:
 Base: 16,81 cm
 Altura: 16,80 cm
 Área: 40,29 cm²
 Ix: 2.594,54 cm⁴
 Iy: 1.297,27 cm⁴
 Iz: 1.297,27 cm⁴

Pórtico de vigas
 Nombre del pórtico: 471.5
 Nº de vigas: 1
 Viga actual: 471.5.1
 Longitud viga (m): 13,13

Material
 Nombre: ACERO_S275
 Tipo Acero: S275
 Fyk: 275.000 Fu: 410.000

Comprobaciones
 Cumple normativa

Resistencia
 ELU desfavorable: 1
 Coeficiente Resistencia: 0,20
 Ten. Von Mises (N/mm²): 53,36
 Comprobaciones: Cumple

Pandeo
 ELU desfavorable: 1
 β Pandeo plano XY local: 1,00
 β Pandeo plano XZ local: 0,50
 Coeficiente Pandeo: 0,50
 Chi Z: 0,13
 Chi Y: 0,45
 Comprobaciones: Cumple

Pandeo lateral
 ELU desfavorable:
 β Pandeo lateral: 0,00
 Coeficiente Pandeo lateral: 0,00
 Chi lateral: 1,00
 Comprobaciones: Cumple

Flecha
 ELS desfavorable: 1
 Flecha relativa (elástica) (cm): -0,189
 Flecha activa (cm): 0,076
 Coeficiente Flecha activa: 0,02
 Flecha instant. (cm): 0,066
 Coeficiente Flecha instantánea: 0,02
 Flecha casi-perm (cm): 0,142
 Coeficiente Flecha casi-permanente: 0,03
 Tipo de vano: Voladizo
 Flecha activa/L: 1/ 17,377
 Límite Flecha activa: 1/ 400
 Flecha instant./L: 1/ 19,860
 Límite Flecha instantánea: 1/ 350
 Flecha casi-perm/L: 1/ 9,268
 Límite Flecha casi-permanente: 1/ 300
 Comprobaciones: Cumple

Imagen 05.04. Solución para el cumplimiento de la barra

05.02.01.02 | Rama del árbol estructural

Se escoge la barra diagonal interior que llega al soporte debido a que recoge las cargas de la cúpula del árbol estructural así como la parte correspondiente de cargas de los tres módulos formados simplemente por cubierta y forjado de hormigón.

El valor del axil máximo se sitúa en los 1.383,62 kN. Comprobado el valor de los axiles, la barra se dimensiona con un acero S-275 y se realiza su peritación. Como se puede apreciar en la [imagen 05.07], el dimensionado es correcto puesto la barra trabaja al 93% de su capacidad resistente y el valor de la tensión máxima en la hipótesis más desfavorable es de 242,96 N/mm² frente a los 266 N/mm² que supone el límite elástico minorado.

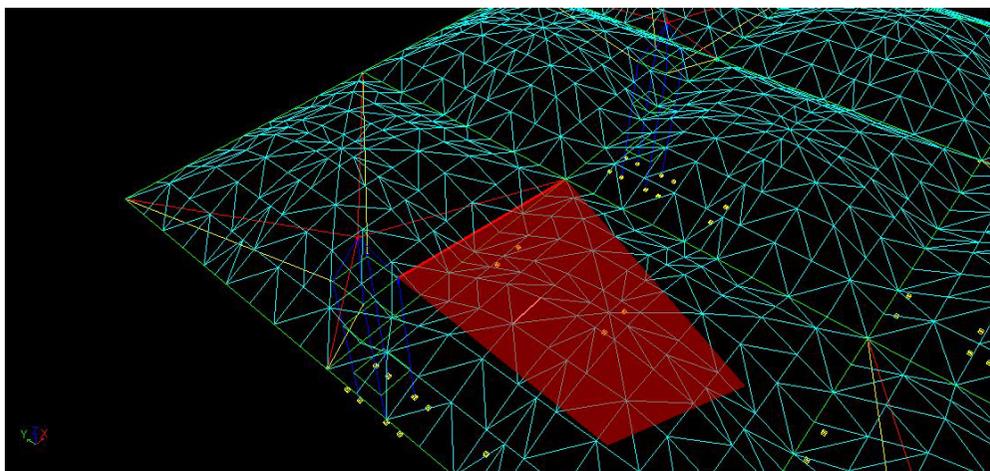


Imagen 05.05. Diagrama de axiles de la rama del árbol estructural

Por lo que respecta a los momentos, la dirección más desfavorable es la dirección Z, con un $M_z=133,954$ kN, el cual se ubica en el encuentro de la rama estructural con la coronación del soporte que compone el tronco del árbol estructural.

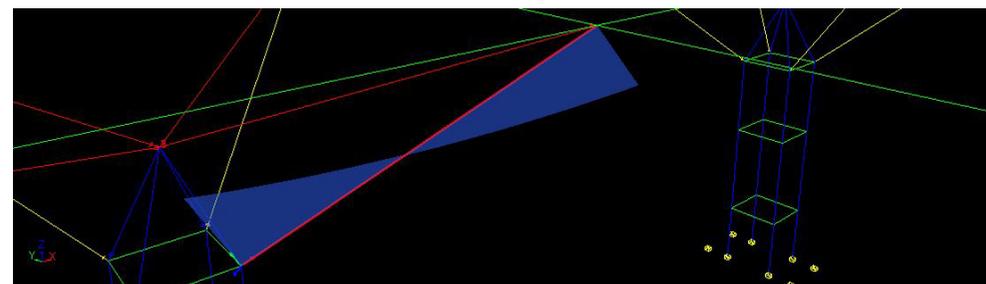
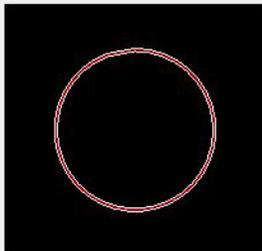


Imagen 05.06. Diagrama de momentos de la rama del árbol estructural



Material
Nombre: ACERO_S275
Tipo Acero: S275
Fyk: 275.000 Fu: 410.000

Sección
Tipo de sección: PHOUNEic 406.4x8

Propiedades

Base:	40,59 cm
Altura:	40,56 cm
Área:	100,13 cm ²
Ix:	39.747,75 cm ⁴
Iy:	19.873,87 cm ⁴
Iz:	19.873,87 cm ⁴

Peritar Optimizar

Pórtico de vigas

< Ver viga anterior

Nombre del pórtico: 11.4
Nº de vigas: 1
Viga actual: 11.4.1

Ver viga siguiente >

Longitud viga (m): 13,07

Comprobaciones
Cumple normativa

Guardar Restablecer

<< Información básica

Resistencia		Flecha	
ELU desfavorable: 1	Ten. Von Misses (N/mm ²): 242,96	ELS desfavorable: 1	Tipo de vano: Voladizo
Coefficiente Resistencia: 0,93	Comprobaciones: Cumple	Flecha relativa (elástica) (cm): -3,130	
Pandeo		Flecha activa (cm): 1,252	Flecha activa/L: 1/ 1.044
ELU desfavorable: 1	Chi Z: 0,67	Coefficiente Flecha activa: 0,38	Límite Flecha activa: 1/ 400
β Pandeo plano XY local: 0,94	Chi Y: 0,91	Flecha instant. (cm): 1,096	Flecha instant./L: 1/ 1.193
β Pandeo plano XZ local: 0,51	Comprobaciones: Cumple	Coefficiente Flecha instantánea: 0,29	Límite Flecha instantánea: 1/ 350
Coefficiente Pandeo: 0,93		Flecha casi-perm (cm): 2,348	Flecha casi-perm/L: 1/ 557
Pandeo lateral		Coefficiente Flecha casi-permanente: 0,54	Límite Flecha casi-permanente: 1/ 300
ELU desfavorable:	Chi lateral: 1,00	Comprobaciones: Cumple	
β Pandeo lateral: 0,00			
Coefficiente Pandeo lateral: 0,00	Comprobaciones: Cumple		

Imagen 05.07. Cumplimiento de la rama estructural

05.02.01.03 | Tirante

La comprobación de los tirantes se va a realizar manualmente puesto que debido al material asignado, el programa Architrave no es capaz de calcularlo. Debido a esto, se va a comprobar con los dos tirantes que Foster plantea en su proyecto y no con la simplificación que se ha habido realizado para modelizar la estructura. Como se ha comentado anteriormente, estos tirantes consistían en dos cables de 7,5 milímetros de diámetro. El valor del axil al que está sometido sí ha sido posible conocerlo mediante Architrave, con un valor de 44,999 kN.

Por la categoría de cables, la resistencia de cálculo del acero f_{yd} puede llegar hasta valores de 2000 N/mm^2 . Sin embargo, vamos a considerar una $f_{yd}=1000 \text{ N/mm}^2$ para la comprobación de manera que:

$$\sigma = \frac{N_d}{A} = \frac{3,340 \times 10^3}{2 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{44,999 \times 10^3}{2 \cdot \pi \cdot 3,75^2} = 509,285 \text{ N/mm}^2 \leq f_{yd} = 1000 \text{ N/mm}^2$$

Por lo tanto, se considera aceptable la dimensión de los cables recogida de la bibliografía.

Por lo tanto, se considera aceptable la dimensión de los cables recogida de la bibliografía.

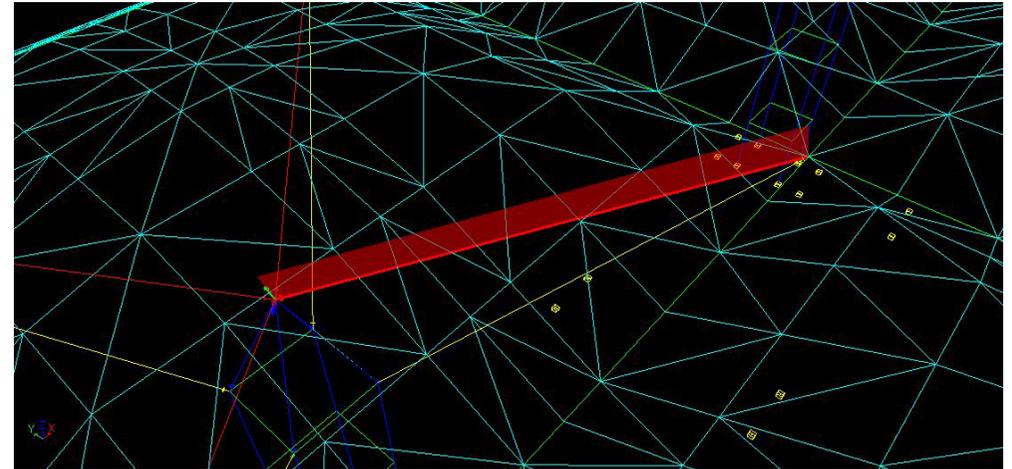


Imagen 05.08. Diagrama de axiles del tirante

05.02.01.04 | Tronco del árbol estructural

Debido a la modelización del soporte por tramos, se va a estudiar el tramo inferior, aquel que transmite todos los esfuerzos de la estructura a la cimentación de zapatas aisladas.

El axil máximo al que está sometido el soporte es de 213,301kN, situado en la unión con la cimentación.

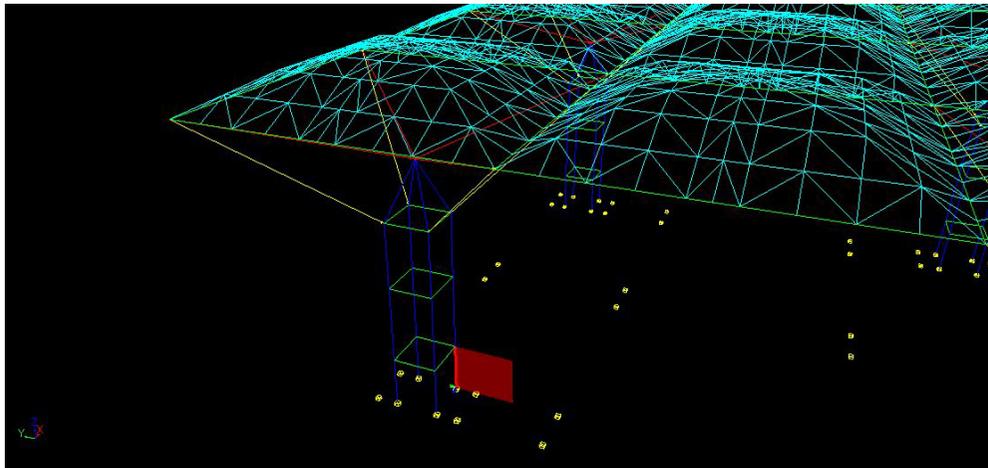
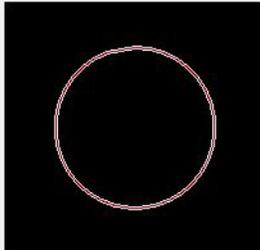


Imagen 05.09. Diagrama de axiles del tramo inferior del soporte perteneciente al tronco estructural

Como puede comprobarse en la imagen siguiente [imagen 05.10], el dimensionado es correcto, mencionando que la barra en la sección dada solamente al 13% de su capacidad portante, de manera que podría optimizarse la construcción del soporte un perfil de menor sección. Esto sobredimensionado podría ser debido por la construcción de la estructura metálica antes que el forjado, afectando esto al pandeo.



Sección

Tipo de sección: PH0UNElc 508x8

Propiedades

Base: 50,75 cm
 Altura: 50,69 cm
 Área: 125,66 cm²
 Ix: 78.559,79 cm⁴
 Iy: 39.279,90 cm⁴
 Iz: 39.279,90 cm⁴

Material: ACERO_S275
 Tipo Acero: S275
 Fyk: 275.000 Fu: 410.000

Columna de pilares

Ver pilar superior

Nombre de la columna: 7
 Nº de pilares: 5
 Pilar Actual: 7.1

Ver pilar inferior

Longitud pilar (m): 3,44

Comprobaciones: **Cumple normativa**

Guardar Restablecer

<< Información básica

Resistencia

ELU desfavorable: 3 Ten. Von Mises (N/mm²): 33,80
 Coeficiente Resistencia: **0,13** Comprobaciones: **Cumple**

Pandeo

ELU desfavorable: 3
 β Pandeo plano XY local: 0,56 Chi Z: 1,00
 β Pandeo plano XZ local: 0,56 Chi Y: 1,00
 Coeficiente Pandeo: **0,09** Comprobaciones: **Cumple**

Pandeo lateral

ELU desfavorable:
 β Pandeo lateral: 0,00 Chi lateral: 1,00
 Coeficiente Pandeo lateral: **0,00** Comprobaciones: **Cumple**

Flecha (no aplicable en pilar)

ELS desfavorable:
 Flecha relativa (elástica) (cm):
 Flecha activa (cm): Flecha activa/L: 1/
 Coeficiente Flecha activa: Límite Flecha activa: 1/ 400
 Flecha instant. (cm): Flecha instant./L: 1/
 Coeficiente Flecha instantánea: Límite Flecha instantánea: 1/ 350
 Flecha casi-perm (cm): Flecha casi-perm/L 1/
 Coeficiente Flecha casi-permanente: Límite Flecha casi-permanente: 1/ 300
 Comprobaciones: **Cumple**

Imagen 05.10. Cumplimiento del tronco estructural

05.02.02 | ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN

Para el caso de la estructura de hormigón se van a comprobar dos elementos distintos: un pilar interior del módulo sin estructura metálica y la parte del forjado circundante a este pilar debido a que es donde se concentran los mayores momentos, como se comprobará a continuación.

05.02.02.01 | Soporte circular interior

Se escoge esta barra pues es una de las que más ámbito de uso sustentan del forjado, debido a que la distancias entre este soporte y los otros pilares tanto en la dirección X como en la dirección Y son las mayores posibles dentro del modelo.

El mayor axil al que está sometido el soporte se sitúa en el encuentro de éste con la cimentación, con un valor de 3.410,284 kN.

Por lo que respecta al momento más grande, éste se encuentra en el My de la coronación del soporte con un valor de -1380,745 kN·m.

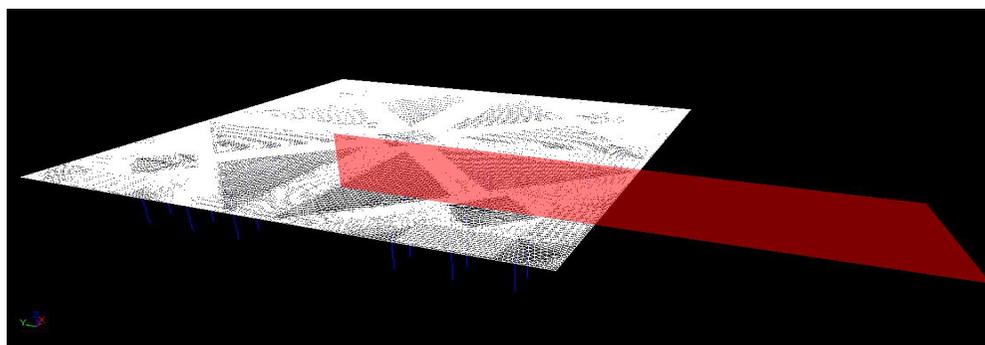


Imagen 05.11. Diagrama de axiles del soporte de hormigón interior

Tras el dimensionado con un hormigón armado HA-25 y su posterior peritación, se observa en la [imagen 05.13] como, a pesar de ser un elemento de grandes dimensiones con un diámetro de 1,20 metros, este trabaja con unos coeficientes de resistencia razonables.

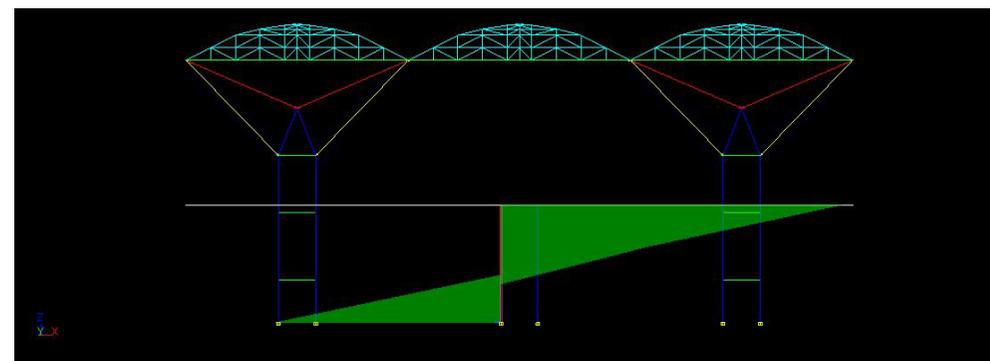


Imagen 05.12. Diagrama de momentos My del soporte de hormigón interior

Amado

Perimetral: 15 Ø 20

Solape: 60 cm

Cercos: Ø 8 / 30

Geometría

Longitud Pilar: 940,00 cm

L Pandeo Y: 533,21 cm

Esbeltez Y: 17,77

L Pandeo Z: 531,15 cm

Esbeltez Z: 17,70

Sección

Diámetro: 120,00 cm

Área: 11.309,73 cm²

Ix: 20.357.524,1 cm⁴

Iy: 10.178.762,1 cm⁴

Iz: 10.178.762,1 cm⁴

Columna de pilares

Ver pilar superior

Nombre de la columna: 31

Nº de pilares: 1

Pilar actual: 31.2

Ver pilar inferior

Comprobaciones

Resultados mecánicos

Cap. mecánica U. tot: 1.884,96 kN

Cuantía mecánica w: 0,10

Cortante resist. Vu1: 239,38 kN

Cortante resist. Vu2: 6.930,00 kN

Cortante solicit. Vrd: 539,90 kN

Eje Y: 239,38 kN

Eje Z: 239,38 kN

6.930,00 kN

539,90 kN

Comprobaciones

Modifique las dimensiones de la sección o su armado hasta que todos los coeficientes de resistencia, correspondientes al conjunto de ELU, sean menores o iguales a 1,00. En todo caso, se recomienda recalcular y redimensionar el modelo con los cambios realizados.

Coefficiente a mostrar

Seguridad Aprovechamiento

ELU	Posición	Nd (kN)	Myd (mkN)	Mzd (mkN)	Nu (kN)	Myu (mkN)	Mzu (mkN)	Coefficiente
1	Superior	3.051,48	-1.261,78	-1.292,03	3.947,25	-1.631,09	-1.670,20	0,77
1	Inferior	3.410,28	613,20	647,55	10.722,74	1.920,15	2.027,71	0,32
2	Superior	3.009,91	-1.380,75	-1.293,10	3.547,55	-1.628,56	-1.525,19	0,85
2	Inferior	3.368,71	833,41	647,54	9.243,47	2.283,57	1.774,28	0,36
3	Superior	2.678,96	-1.333,27	-1.165,04	3.265,84	-1.622,15	-1.417,47	0,82
3	Inferior	3.037,76	916,87	583,08	8.072,65	2.436,11	1.549,25	0,38

Imagen 05.13. Cumplimiento del soporte de hormigón con un diámetro de 1,20 m

Debido a esto y a que como se muestra en la [imagen 05.14], un diámetro de 1,10 metros de diámetro no resulta válido, se considera que todos los soportes de hormigón del sótano estarán dimensionados con la sección de 1,20 metros, variando, eso sí, el armado entre soportes.

Armado
Perimetral: 15 Ø 20
Solape: 60 cm
Cercos: Ø 8 / 30

Geometría
Longitud Pilar: 940.00 cm
L Pandeo Y: 533.21 cm
Esbeltez Y: 18.68
L Pandeo Z: 531.15 cm
Esbeltez Z: 18.63

Sección
Diámetro: 110.00 cm
Área: 9.503.32 cm²
I_x: 14.373.769.0 cm⁴
I_y: 7.186.894.50 cm⁴
I_z: 7.186.894.50 cm⁴

Columna de pilares
Nombre de la columna: 31
Nº de pilares: 1
Pilar actual: 31.2

Comprobaciones
Falla

Resultados mecánicos
Cap. mecánica U. tot: 1.884.96 kN
Cuantía mecánica u: 0.12

ELU	Posición	Nd (kN)	Myd (m kN)	Mzd (m kN)	Nu (kN)	Myu (m kN)	Mzu (m kN)	Coefficiente
1	Superior	3.051.48	-1.261.78	-1.292.03	3.136.63	-1.297.80	-1.328.91	0.97
1	Inferior	3.410.28	613.20	647.55	8.628.46	1.555.92	1.643.07	0.40
2	Superior	3.009.91	-1.380.75	-1.293.10	2.833.95	-1.302.66	-1.219.97	1.06
2	Inferior	3.368.71	833.41	647.54	7.401.74	1.830.39	1.422.18	0.46
3	Superior	2.678.96	-1.333.27	-1.165.04	2.611.79	-1.301.73	-1.137.48	1.03
3	Inferior	3.037.76	916.87	583.08	6.408.84	1.935.38	1.230.81	0.47

Imagen 05.14. Fallo del soporte de hormigón con un diámetro de 1,10 m

05.02.02.02 | Forjado del vestíbulo

En un primer momento se deben comprobar los mapas de color de los momentos en la dirección X (M_x) y en la dirección (Y) puesto que la distribución de pilares no es simétrica en las dos direcciones y mientras en el eje X se observa un vano en la zona central, en el eje Y aparecen pilares.

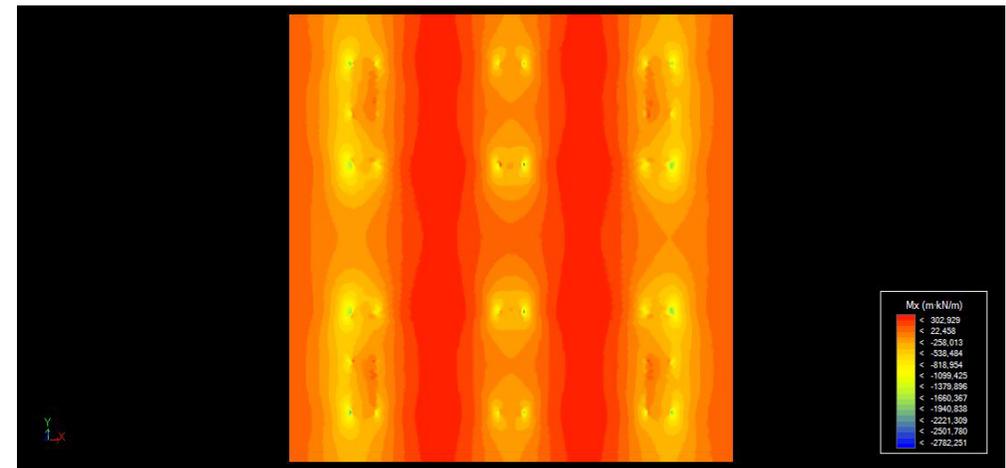


Imagen 05.15. Mapa de color de momentos M_x

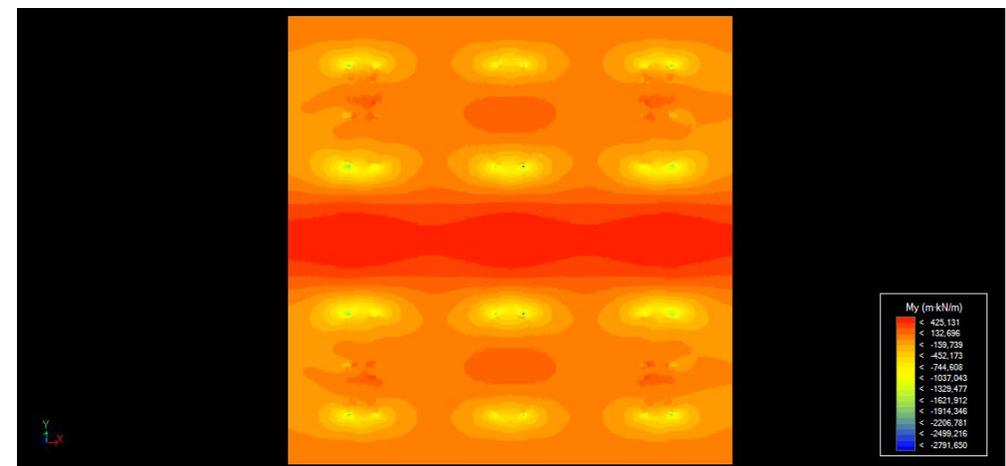


Imagen 05.16. Mapa de color de momentos M_y

Tanto en el mapa de color de M_x como en el de M_y , observamos que, dejando de lado la simetría, los valores máximos de los momentos tienen prácticamente el mismo valor: 2.782,251 kN en el caso de los momentos en la dirección X y 2.791,650 kN en el caso de los momentos de la dirección Y.

Sin embargo, estos valores no se pueden considerar representativos puesto que se producen en la coronación del soporte y Architrave concibe el soporte como una línea sin dimensión. En la realidad, el soporte sí tiene una dimensión física y, por lo tanto, los valores máximos que suceden dentro de la sección desaparecen, como se puede entender en el siguiente esquema:

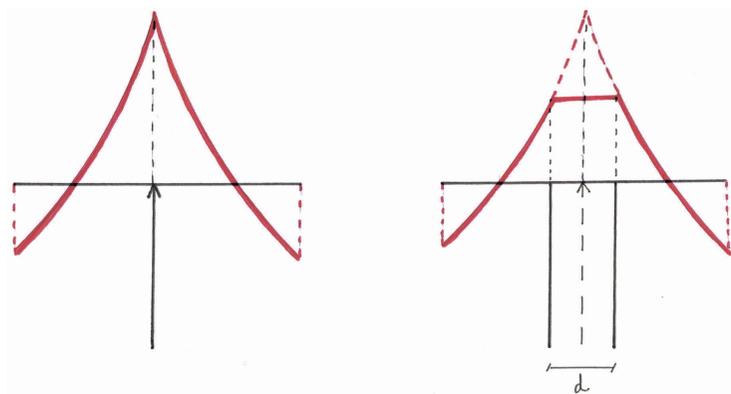


Imagen 05.17. Esquema de la relación entre el momento máximo y la dimensión del soporte

Debido a esto, los valores representativos que se deben tomar son aquellos que se encuentran en las proximidades del pilar, siendo para este estudio en concreto una distancia superior a los 0,60 metros desde el eje geométrico del soporte.

Si se toma un elemento finito cercano al pilar se observa que los valores representativos en este caso si que presentan una diferencia entre ellos: 802,60 kN/m para el valor M_{xd} y 1226,766 kN/m para el valor M_{yd} .

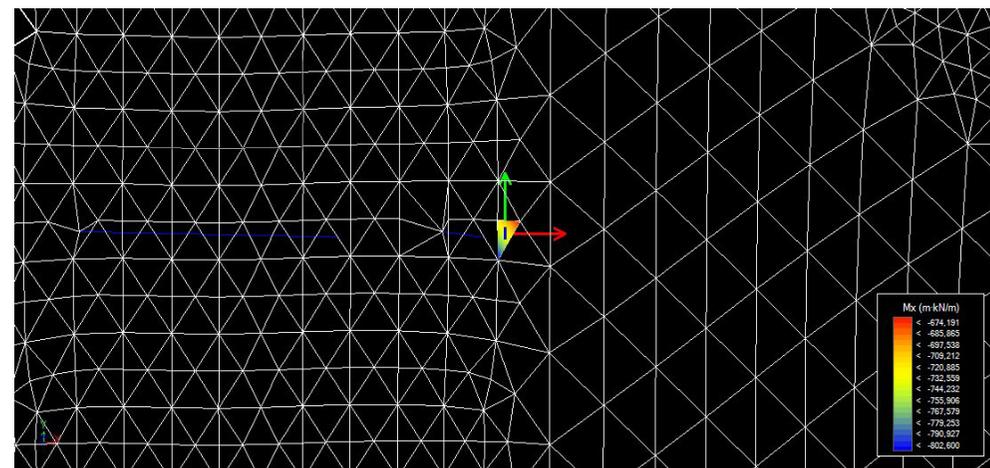


Imagen 05.18. Mapa de color de los momentos M_x representativos

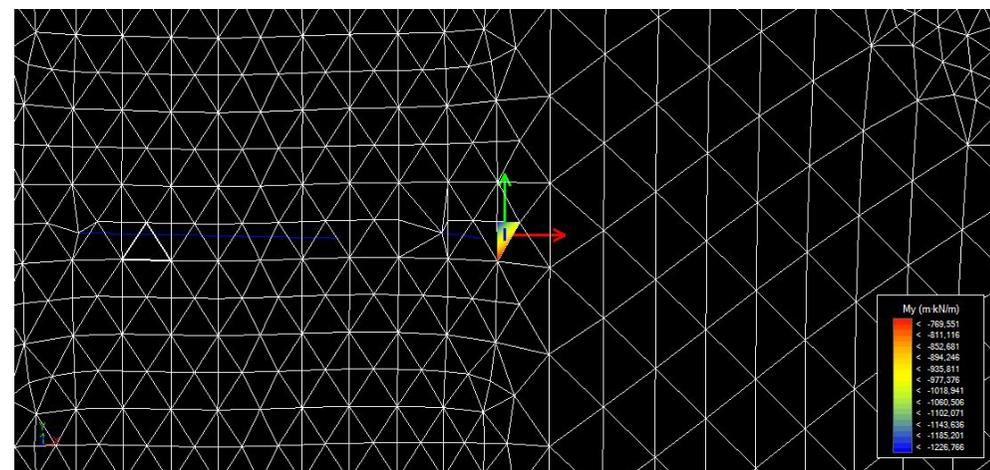


Imagen 05.19. Mapa de color de los momentos M_y representativos

Tomando como valor M_{yd} uno valor aproximado de 1200 kN/m, se podría dimensionar qué armado sería necesario para construir la superficie maciza circundante a los pilares de la losa reticular aligerada.

Para ello se dispone la siguiente [imagen 05.20] en la cual, mediante una hoja de cálculo Excel se ha llegado a la solución de disponer la misma armadura en las dos direcciones, calculada en la dirección más desfavorable como se muestra en el ejemplo de la [imagen 05.21] y de la [imagen 05.22].

Cabe destacar que las imágenes de ejemplo no son la solución final del proyecto estudiado.

Dimensionado a flexión simple de una sección rectangular

HORMIGÓN		ACERO		SOLICITACIONES	
$f_{ck} =$	25 N/mm ²	$f_{yk} =$	500 N/mm ²	M =	200 kN·m
$\gamma_c =$	1,5	$\gamma_s =$	1,15	$\gamma_f =$	1,5
$f_{cd} =$	16,67 N/mm ²	$f_{yd} =$	434,78 N/mm ²	$M_d =$	1200 kN·m
$\alpha =$	0,85				

	B =	1000 mm	$y_{lim} =$	394,79 mm
	H =	850 mm	$F_{lim} =$	5592,85 kN
	recub =	50 mm	$M_{lim} =$	3370,28 kN·m
	d =	800 mm		
	d' =	750 mm		

Ecuaciones de equilibrio

$$\Sigma M_z = 0 \quad \alpha \cdot f_{cd} \cdot B \cdot \gamma \cdot (d - 0,5 \cdot y) = M_d = 1200,00 \quad \text{kN·m} \quad 3370,28022$$

$$\Sigma F = 0 \quad \alpha \cdot f_{cd} \cdot B \cdot \gamma = U_1$$

Resolución de la ecuación de segundo grado

a = 7083,33333	raíces	
b = -11333333,3	y1 =	1485,99 mm
c = 1200000000	y2 =	114,01 mm

Solución posición fibra neutra:

$$y_{sol} = 114,01 \text{ mm}$$

Dimensionado de la armadura

$$U_1 = \alpha \cdot f_{cd} \cdot B \cdot \gamma = 1615080,18 \text{ kN} \quad A_1 = 3714,68 \text{ mm}^2$$

Imagen 05.20. Cálculo de la armadura necesaria

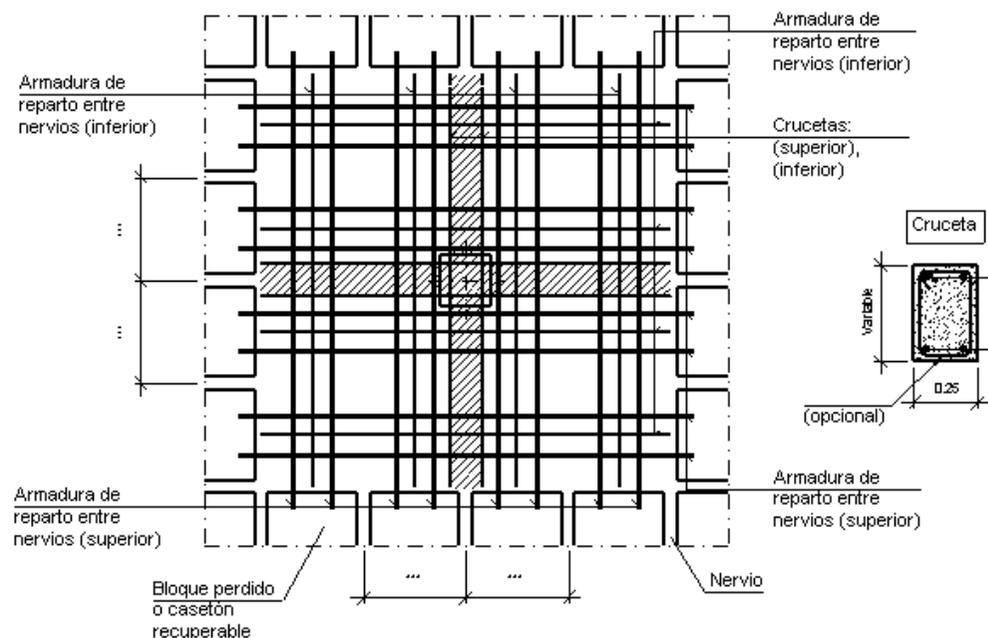


Imagen 05.21. Planta tipo del ábaco de forjado reticular con casetones recuperables

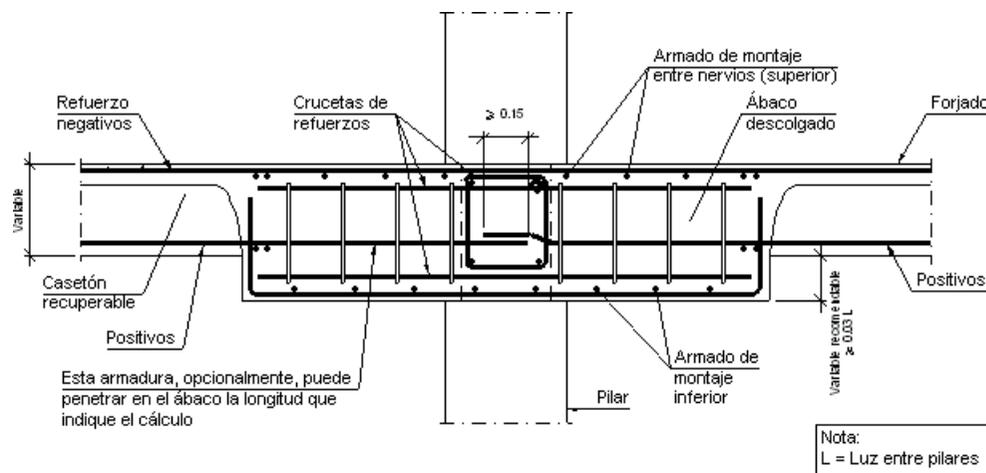


Imagen 05.22. Sección tipo del ábaco de forjado reticular con casetones recuperables

05.03 | DEFORMACIONES DEL MÓDULO BÁSICO

Las comprobaciones pertinentes al módulo básico del árbol estructural se han realizado únicamente con cargas gravitatorias.

05.03.01 | LA CUBIERTA

Para el caso de la estructura metálica se van a comprobar cuatro barras distintas, todas ellas dispuestas en el interior del modelo de nueve módulos pues reciben más cargas, debido a su ámbito de uso, que los elementos de los extremos exteriores.

05.03.01.01 | Deformaciones verticales

En el estudio de las deformaciones verticales se ha podido comprobar que éstas son mucho mayores en ELS 01, con un valor de 3,878 cm en sentido descendente, debido a que tienen en cuenta la sobrecarga de uso repartida en toda la superficie de 1 kN/m². Sin embargo, esta sobrecarga no se espera que esté actuando simultáneamente en toda la superficie. De la misma manera, al ser una carga variable, los valores de las deformaciones que se pueden esperar en la cubierta son más aproximados a los obtenidas en la HIP 01, con un valor de 1,454 cm.

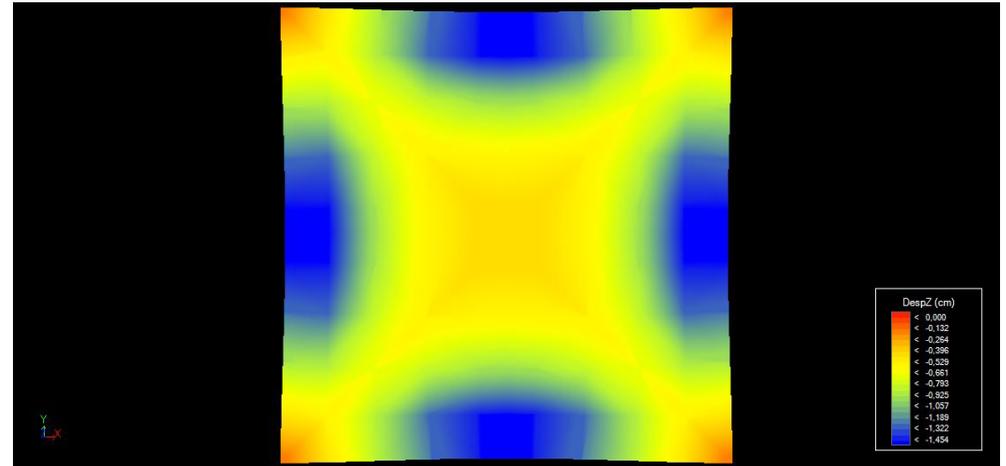


Imagen 05.24. Mapa de color de los desplazamientos verticales Dz en HIP 01

05.03.01.02 | Deformaciones verticales

Mediante las deformaciones horizontales en ELS 01 se observa que el módulo experimenta un desplazamiento de los extremos, curvándose hacia el centro simétricamente, como se observa en la [imagen 05.25].

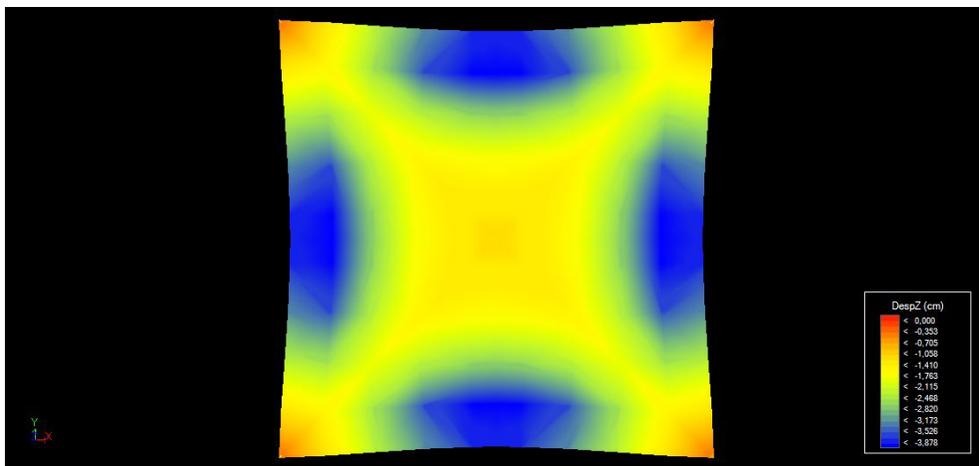


Imagen 05.23. Mapa de color de los desplazamientos verticales Dz en ELS 01

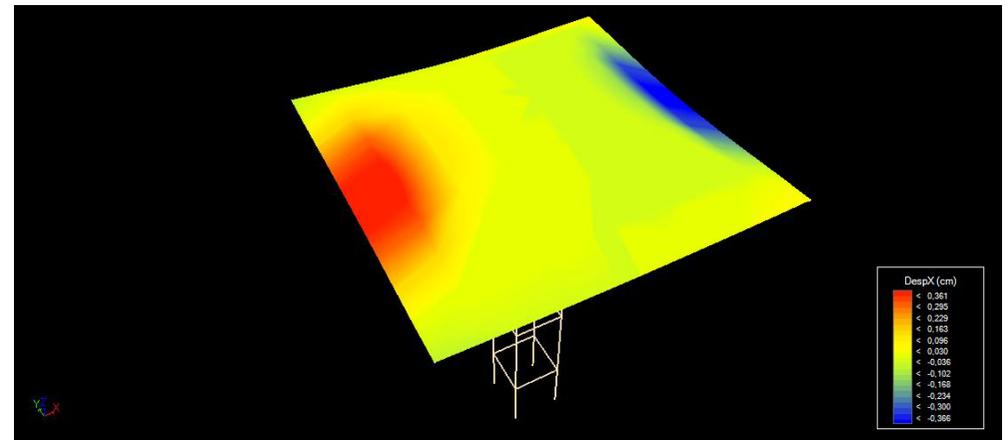


Imagen 05.25. Mapa de color en 3D de los desplazamientos horizontales Dx en ELS 01

05.03.02 | EL FORJADO

05.03.02.01 | Deformaciones verticales

En la combinación ELS 01, las deformaciones verticales máximas del forjado son del valor de 6,639 cm y se sitúan en los vértices del módulo debido a que los pilares que lo sustentan se encuentran en el centro geométrico, lo cual produce que el elemento trabaja como si fuera un voladizo [imagen 05.26]. De esta manera, según aumenta la distancia entre los pilares y el punto a analizar, las deformaciones aumentan. Sin embargo, estas deformaciones son irreales pues se ven corregidas cuando se establecen más módulos en el modelo de cálculo, gracias a la continuidad de la losa.



Imagen 05.26. Deformación del modelo sólido 3D

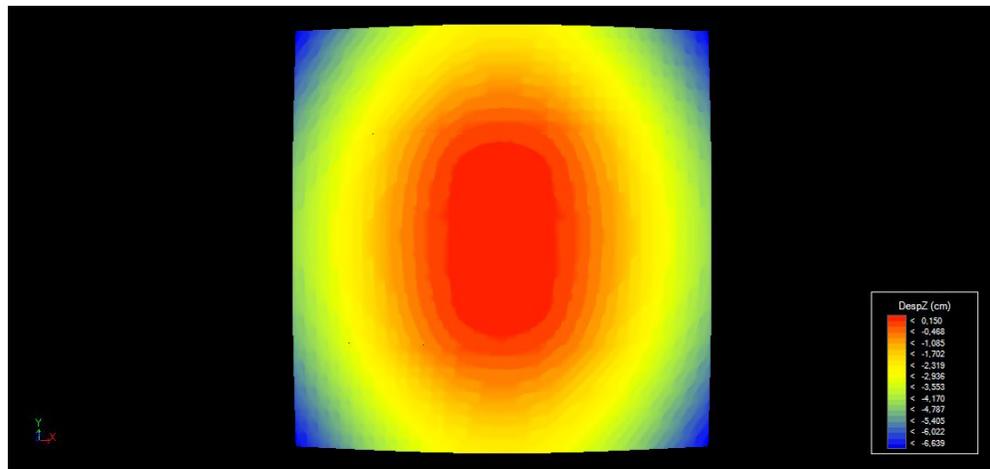


Imagen 05.27. Mapa de color de los desplazamientos verticales Dz en ELS 01

05.03.02.02 | Deformaciones horizontales

Como se puede observar, las deformaciones horizontales del forjado del módulo básico para la combinación ELS 01 son prácticamente despreciables, fijando sus máximos en la coronación de los soportes circulares de hormigón. Estos desplazamientos se deben a la curvatura de los soportes producida por la flexión.

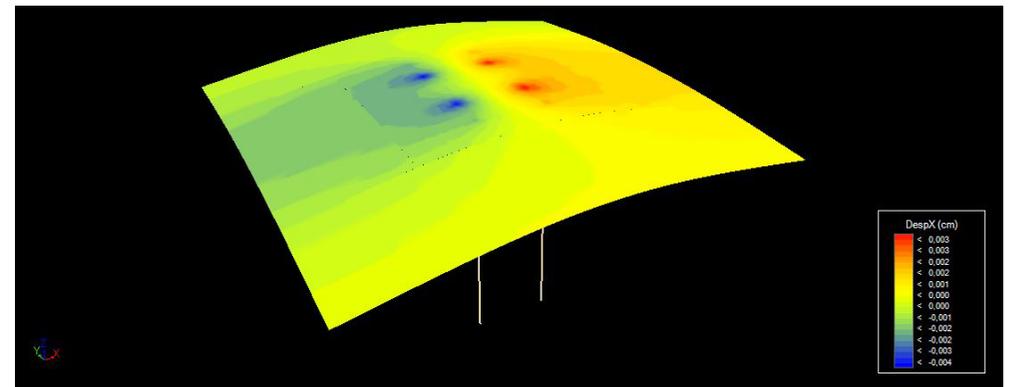


Imagen 05.28. Mapa de color en 3D de los desplazamientos horizontales Dx en ELS 01

05.04 | DEFORMACIONES DEL MODELO DE NUEVE MÓDULOS

El módulo de nueve módulos está formado por cuatro módulos de árboles estructurales situados en las esquinas con su parte correspondiente de forjado y cinco módulos exclusivamente de cubierta y la estructura de hormigón. En este caso sí que se ha considerado la acción de la carga de viento así como la carga de peso propio del cerramiento de doble acristalamiento, ambas situadas en el borde izquierdo de las imágenes.

05.04.01 | LA CUBIERTA

Para el caso de la estructura metálica se van a comprobar cuatro barras distintas, todas ellas dispuestas en el interior del modelo de nueve módulos pues reciben más cargas, debido a su ámbito de uso, que los elementos de los extremos exteriores.

05.04.01.01 | Deformaciones verticales

Las deformaciones verticales dadas por la combinación de cargas ELS 01 suponen un desplazamiento de 4,246 cm en sentido descendente en el módulo central puesto que no tiene ningún árbol metálico que lo sustente y es la zona más alejada de los cuatro árboles de los extremos.

Como en el estudio del módulo básico, la sobrecarga de uso se encuentra presente en toda la superficie, por lo que es necesario conocer cuáles son las deformaciones obtenidas en la HIP 01, más próximas a la realidad [imagen 05.30].

En esta hipótesis se obtiene un desplazamiento vertical de 1,374 cm, lo que supone una disminución de las deformaciones de alrededor de los 2/3 respecto de la deformación en ELS 01 y siendo incluso menor que la provocada por la HIP 01 en el caso del análisis del módulo básico, en el cual se obtenía un valor de 1,454 cm.

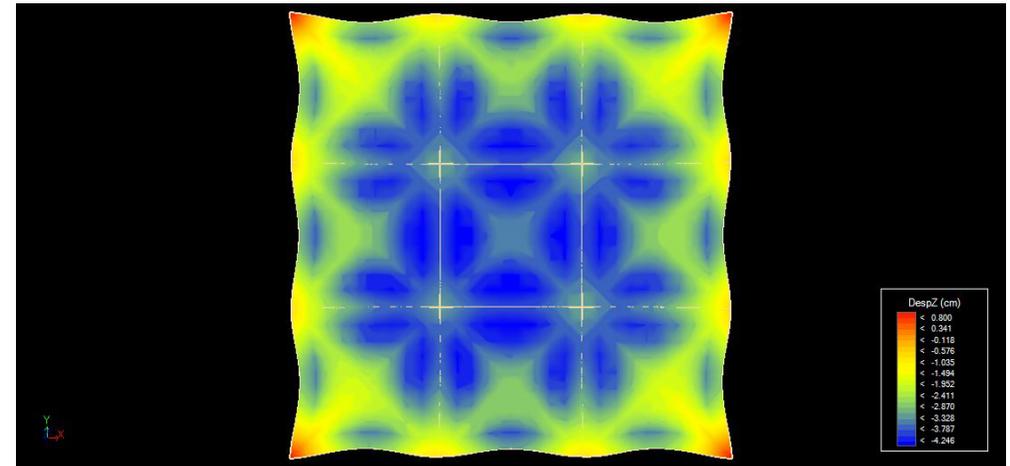


Imagen 05.29. Mapa de color de los desplazamientos verticales Dz en ELS 01

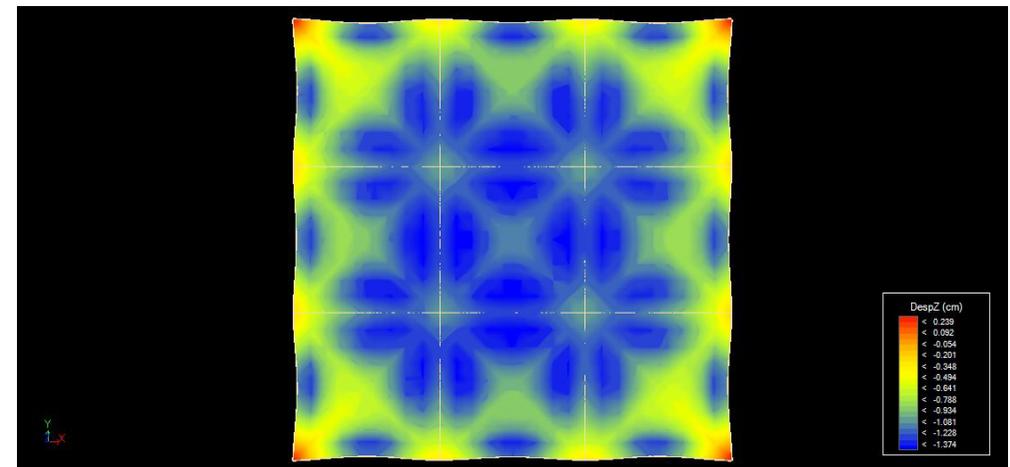


Imagen 05.30. Mapa de color de los desplazamientos verticales Dz en HIP 01

05.04.01.02 | Deformaciones horizontales

Las deformaciones horizontales de ELS 01 se presentan en los bordes de la cubierta. El fenómeno es idéntico al explicado en el apartado del módulo básico [imagen 05.28], observándose un desplazamiento de los extremos, curvándose éstos hacia el centro. Sin embargo, se presenta una mínima asimetría en los dos extremos, debido a que en este caso sí se cuenta con la acción del viento, aplicado solamente en el extremo izquierdo.

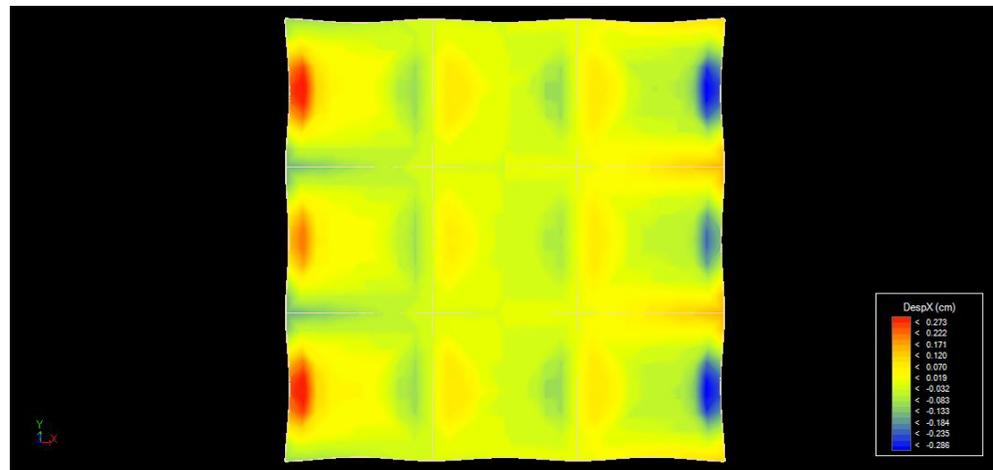


Imagen 05.31. Mapa de color de los desplazamientos horizontales Dx en ELS 01

05.04.01.03 | Deformaciones derivadas del viento

Para tener un estudio detallado del comportamiento de la cubierta, se debe prestar atención a los efectos de la HIP 04 (Carga de viento). Como se muestra en la [imagen 05.32], el viento tiene vital importancia en los desplazamientos verticales de la cubierta, pues a parte de desplazarla horizontalmente, provoca que ésta se deforme como si de un acordeón se tratase, debido a la menor rigidez de la unión entre cúpulas.

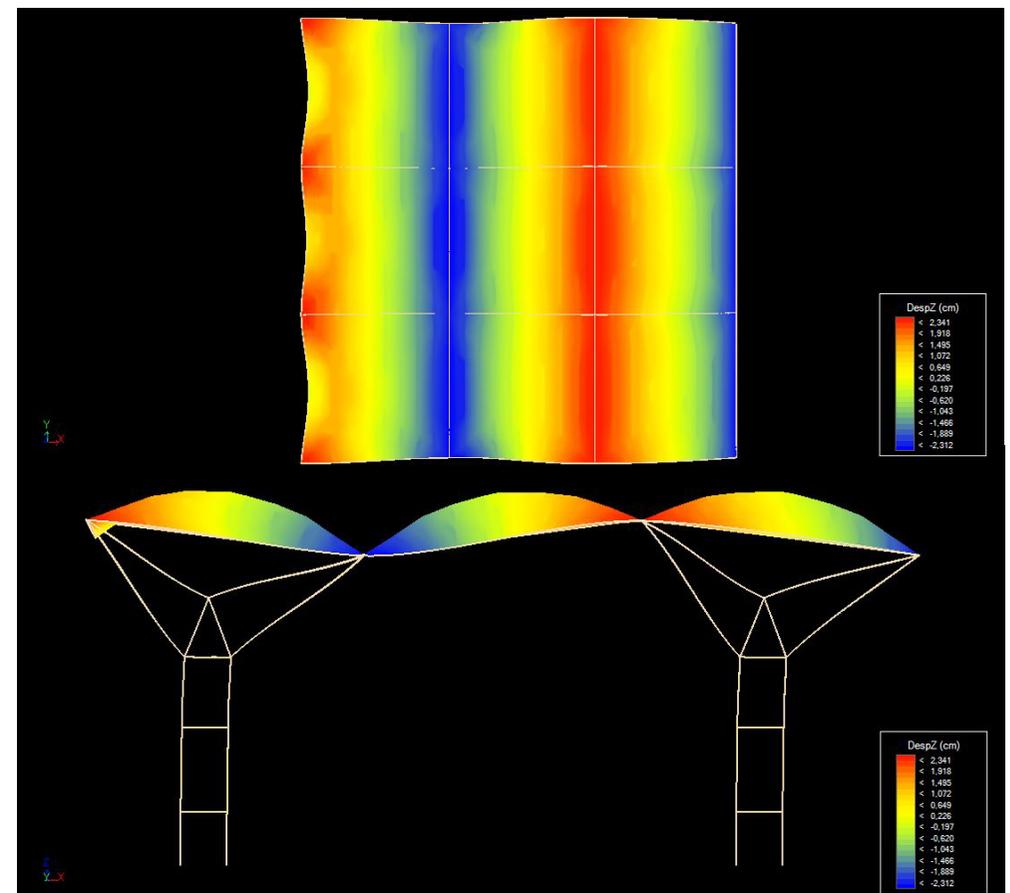


Imagen 05.32. Mapa de color en planta y alzado de los desplazamientos verticales en HIP 04

05.04.02 | EL FORJADO

05.04.02.01 | Deformaciones verticales

En la combinación ELS 01, las deformaciones verticales máximas del forjado se sitúan en los vértices y los extremos del modelo pues consisten en las zonas más alejadas respecto de los pilares de hormigón, comportándose el forjado en estos puntos como si de un voladizo se tratase [imagen 05.14]. Es en el extremo de la zona donde los pilares se encuentran a mayor distancia entre ellos donde se sitúan los puntos de máximo desplazamiento, con un valor de 9,426 cm, presentando una pequeña asimetría entre el extremo izquierdo y derecho debido a la carga que supone el cerramiento del vestíbulo. Sin embargo, estas deformaciones no deben ser consideradas como relevantes para el análisis puesto que el modelo solo representa una pequeña parte de la superficie continua de la losa y no se ha dispuesto ningún elemento estructural en la en planta de sótano que palie esta deformación, lo que supondría que las deformaciones en estos puntos serían más asimilables a un desplazamiento representativo de entorno a los 5 cm (zonas verdes de la [imagen 05.33]).

Según la normativa, la deformación máxima debe ser tal que:

$$f_{\text{máx}} \leq L/500$$

Considerando la distancia entre pilares $L=18\text{m}=1800\text{cm}$, obtenemos que:

$$5,00 \text{ cm} \leq 1800/500 = 3,60 \text{ cm}$$

Por lo tanto, el valor obtenido en los diagramas es mayor que la deformación máxima admisible. Para reducir la deformación obtenida, sin intervenir en la posición de los soportes, se proponen a continuación diferentes soluciones:

01 | Aumentar el canto de la losa

02 | Una estructura postesada en la losa de hormigón

03 | Llevar a cabo un trabajo de contraflechas (no habitual en el caso de elementos de hormigón)

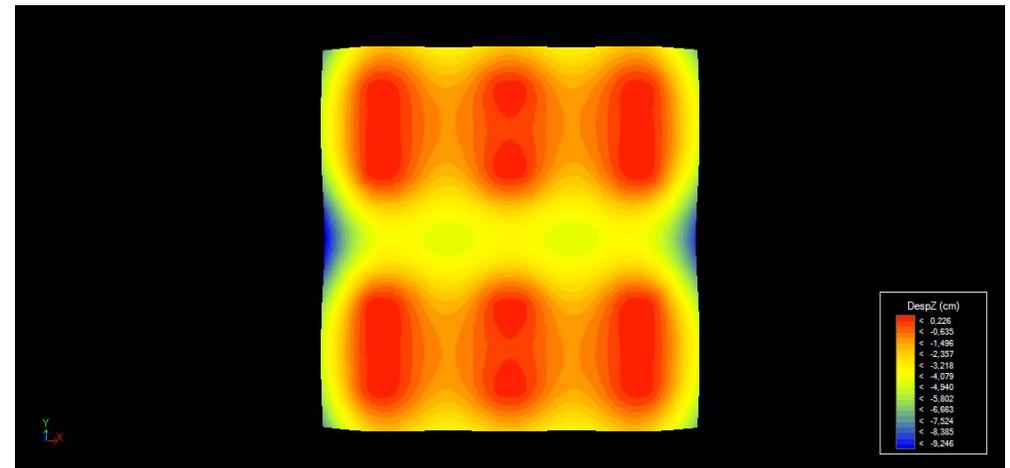


Imagen 05.33. Mapa de color de los desplazamientos verticales Dz en ELS 01

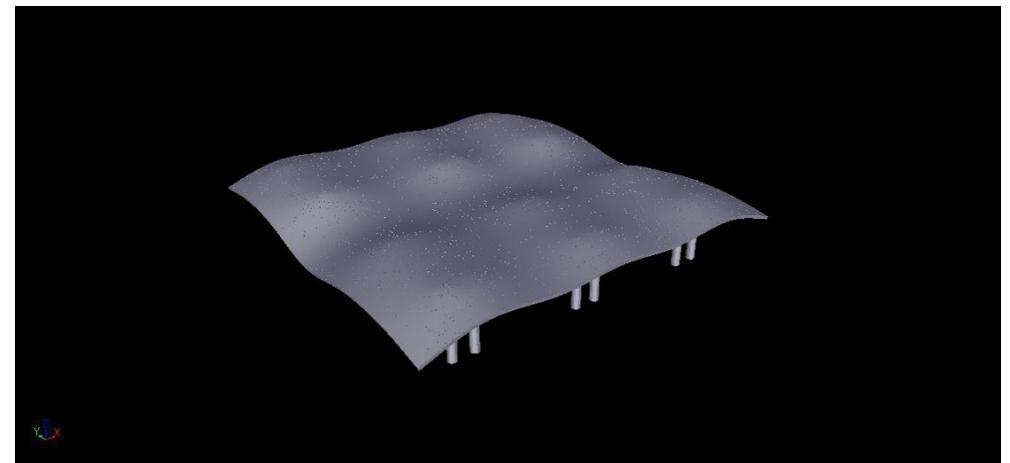


Imagen 05.34. Deformación del modelo sólido 3D

06. CONCLUSIONES

Una vez concluido el arduo trabajo de la aproximación arquitectónica y el diseño estructural de la terminal del Aeropuerto de Stansted proyectado por Foster en 1981 e inaugurado en 1991, se pasa en este punto a extraer una serie de conclusiones que ha permitido conocer este estudio.

Después de una búsqueda exhaustiva en libros, revistas, monográficos y artículos, así como el empleo de páginas web, se ha podido estudiar cómo ha evolucionado la manera de proyectar de Norman Foster, desde sus comienzos cursando sus estudios en las universidades de Manchester y Yale, pasando por el Team 4 y los primeros años de Foster Associates en los que primaba el minimalismo y el organicismo miesiano en la arquitectura fosteriana, continuando el recorrido por la década de los ochenta donde Foster, junto a su mujer Wendy, empieza a mostrar de una manera más brutalista el gusto por la ingeniería y las analogías biológicas dentro de la arquitectura, un organicismo aprendido en este caso de Frank Lloyd Wright. Es en esta década donde se le relaciona con el "High-Tech", marca fundamental de las construcciones de Foster. Desde ese momento y hasta la actualidad, Norman Foster se ha convertido en un referente mundial de la arquitectura actual.

Seguidamente al desarrollo de las etapas profesionales del arquitecto, se llevó a cabo una selección de las obras más representativas de Foster a lo largo de sus más de 50 años al servicio de la arquitectura y la sociedad, aquellas obras que muestran fielmente y de una manera casi directa la manera de ver, razonar, concebir y proyectar su arquitectura. Gracias a este ejercicio de recopilación de las obras se ha podido llegar a conocer y numerar una serie de características presentes en toda su arquitectura:



Imagen 06.01. Vista interior de la cubierta y la estructura

01 | LA RELACIÓN DE LA ARQUITECTURA CON LA NATURALEZA Y EL ENTORNO | Mostrando siempre el respeto por lo preexistente del lugar.

02 | LA FLEXIBILIDAD DE LOS ESPACIOS | Creando espacios lo más flexibles posibles, cambiando su funcionalidad según las necesidades del usuario.

03 | EL USO DE LA TECNOLOGÍA | Apostando siempre por la relación directa entre tecnología, ingeniería y arquitectura en lo que a sus proyectos se refiere.

04 | LA SEPARACIÓN FUNCIONAL POR NIVELES | Definiendo claramente los espacios de trabajo y las zonas de relación.

Estudiadas las características fundamentales de la obra de Norman Foster, se ha descrito con detenimiento el proyecto de la terminal del aeropuerto de Stansted a partir de la documentación extraída de la bibliografía técnica.

La singularidad más significativa consiste en que no solamente separa las funciones en niveles distintos si no que a cada función se le asocia una tipología de estructura: existen dos estructuras, diferentes e independientes entre sí. La estructura metálica fue construida anteriormente a la estructura de hormigón y debido a las dimensiones del proyecto, estas dos no trabajan conjuntamente para permitir los movimientos entre ellas.

Otra característica definitoria del proyecto es la simbiosis entre la naturaleza y la arquitectura mediante unos árboles estructurales las ramas y los troncos de los cuales están formados por perfiles tubulares huecos de acero que consiguen sustentar la cubierta de cúpulas trianguladas y proporcionar un espacio de grandes luces en el interior del vestíbulo.

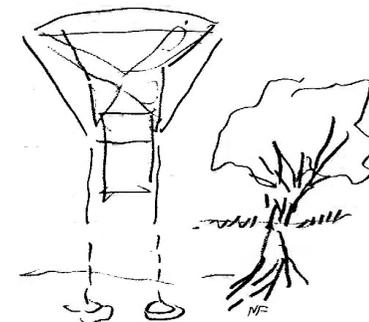


Imagen 06.02. Croquis de Foster en el que se ve la semejanza de la estructura con un árbol

Realizada la aproximación arquitectónica y conocidas las características geométricas y constructivas, se pasó a realizar el modelo 3D que sería después motivo de análisis y cálculo estructural. Debido a la complejidad y grandiosidad del proyecto, se simplificó la estructura a un modelo formado por cuatro árboles estructurales con su correspondiente parte de la cubierta y cinco módulos formados por forjado y cubierta. Después del modelizado, se asignaron, mediante la aplicación de Architrave en AutoCAD, los materiales, las secciones y los espesores a todos los elementos, a modo de predimensionado, así como las diferentes hipótesis de cargas.

A continuación se realizó el análisis mediante la aplicación informática Architrave, de la cual se obtuvieron las solicitaciones del estado límite último (ELU) más desfavorable en cada caso según el elemento a estudiar y las deformaciones. Debido a la complejidad y la gran cantidad de elementos que surgían en el modelo de nueve módulos, se optó por estudiar solamente un número determinado de elementos, tanto de la estructura metálica como de la estructura de hormigón.

Se dimensionaron los elementos en Architrave y se peritaron, momento en el que se pudo comprobar la idoneidad de la sección, y en el caso de no cumplir se explicó a qué se debía. Se comprobaron para la estructura metálica la diagonal de la cúpula, la cual no cumplía a pandeo, hecho que parecía ser debido a que el programa informático la contabilizaba como continua, no como la suma de cuatro barras arriostradas entre ellas y por otras barras de la cúpula triangulada. Se estudiaron también una rama diagonal, uno de los tirantes, cuya comprobación de esta última se resolvió manualmente, y la sección más desfavorable de uno de los soportes que formaban el tronco del árbol estructural.

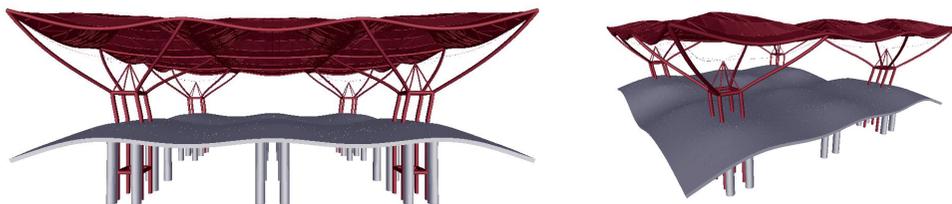


Imagen 06.03. Deformación del modelo sólido 3D

En el caso de la estructura reticular de hormigón, se estudió un soporte del módulo que no disponía de árbol estructural, puesto que esto suponía una mayor distancia del pilar estudiado con respecto a los demás pilares dispuesto en el modelo. Se resolvió el pilar cumpliendo con lo establecido en el predimensionado (1,20 metros de diámetro) y se dispuso el mismo diámetro para todos los pilares debido a que el coeficiente resistente se encontraba suficientemente cercano a la unidad. Se tuvo en cuenta que aunque todos los pilares fueran iguales en cuanto a diámetro, cada uno sería armado con la armadura correspondiente. De la misma manera, se estudiaron los momentos en las dos direcciones del forjado, debido a la asimetría de éste, estudiando con detalle que los valores máximos no era representativos debidos a la sección del soporte y por tanto, comprobando un elemento finito próximo al pilar, estableciendo cuanto armado se necesitaría y exponiendo una serie de ejemplos de colocación de las armaduras.

También se analizaron las deformaciones de la cubierta y del forjado por separado, dando muestra primero de qué sucedía en el módulo básico del árbol estructural y después estudiando las similitudes y diferencias que aparecían en ambos ejemplos.

Se estudiaron en un primer momento las deformaciones verticales de la combinación de cargas en estado límite de servicio (ELS) característica de las cargas gravitatorias y las de uso. Se establecieron cuales eran las deformaciones máximas en cubierta, siendo valores no representativos debido a la sobrecarga de mantenimiento provocaba una deformación excesiva y se entendió que ésta no iba a estar aplicada simultáneamente en toda la extensión de la superficie, de manera que se eligieron como valores representativos los dados en la deformación vertical provocada por la hipótesis de cargas de peso propio de los elementos.

Por lo que respecta las deformaciones horizontales de la cubierta, éstas eran producidas por la acción de la carga de viento horizontal repartida en el borde de la cubierta, dando como resultado que la cubierta se plegara como si de un acordeón se tratase.

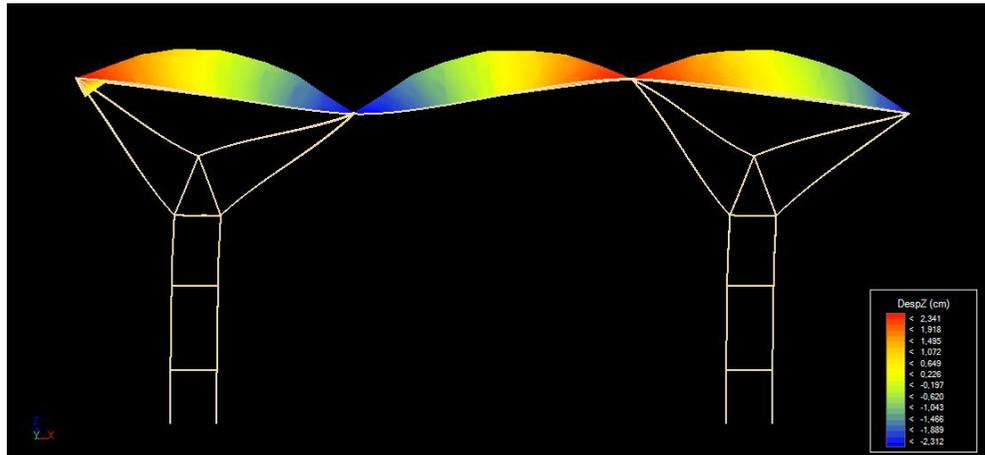


Imagen 06.04. Deformación horizontal y vertical provocada por la acción del viento

En cuanto al forjado de hormigón, se observó que los valores máximos de las deformaciones verticales se encontraban en los bordes del forjado y que en la realidad esos bordes están materializados con la continuidad de la losa, por lo que los representativos (centro de vanos) no eran los máximos.

Como conclusión, mencionar que el estudio realizado ha permitido conocer en profundidad la inmensa obra de Foster y ser capaz de modelizar, calcular y analizar mediante medios informáticos una estructura tridimensional singular, obteniendo como resultado un comportamiento óptimo del sistema estructural.

07. BIBLIOGRAFÍA

07.01 | BIBLIOGRAFÍA DOCUMENTAL

07.01.01 | LIBROS

SUDJIC, D. (2011). *Norman Foster: Arquitectura y vida*. Madrid: Turner Noema

FERNÁNDEZ-GALIANO, L. (2009). *Norman Foster: Drawings 1958-2008 Exhibition*. Madrid: Ivorypress Arts + Books

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: Prestel Publishing

RINCÓN, A. (1999). *Norman Foster Obras seleccionadas y actuales de Foster and Partners*. Madrid: Paraninfo

TREIBER, D. (1998). *Norman Foster. Obras y proyectos, 1981-1988*. Madrid: Ediciones Akal S.A.

BENEDETTI, A. (1995). *Norman Foster: Obras y proyectos*. Barcelona: Gustavo Gili S.A.

QUADERNS D'ARQUITECTURA I URBANISME (1989). *Norman Foster. Obras y proyectos, 1981-1988*. Barcelona: Gustavo Gili S.A.

07.01.02 | REVISTAS

AA.VV. (1992). *Norman Foster: A&V Monografías de Arquitectura y vivienda*, 38. Madrid: Arquitectura Viva S.L.

THE ARCHITECTURAL REVIEW (1991). *AR 1991 May*. London: EMAP Publishing Limited

07.01.03 | TESIS

ABELLÁN, R. (2016). *Trabajo final de grado | Torre Swiss-Re: Aproximación arquitectónica y análisis estructural*. Valencia: Servicio Riunet UPV

SOLER, V. (2015). *Trabajo final de grado | Análisis de la estructura del Museo de Arte Contemporáneo en Niteroi (O. Niemeyer)*. Valencia: Servicio Riunet UPV

07.02 | RECURSOS ELECTRÓNICOS

07.02.01 | PÁGINAS WEB

BIOGRAFÍAS Y VIDAS. Norman Foster
https://www.biografiasyvidas.com/biografia/f/foster_norman.html

LOFF.IT. Norman Foster
<http://loff.it/society/efemerides/norman-foster-198629/>

ARTIUM. Premios Pritzker, viaje por la arquitectura contemporánea. Biografía y obra
<http://catalogo.artium.org/dossieres/exposiciones/premios-pritzker-viaje-por-la-arquitectura-contemporanea/biografia-y-obra-2>

UNIVERSIDAD DE NAVARRA. El arquitecto universal
<http://www.unav.es/nuestrotiempo/es/temas/despiece/arquitecto-universal>

UPV. Norman Foster Doctor Honoris Causa
<https://www.upv.es/organizacion/la-institucion/honoris-causa/-norman-foster/discurso-es.html>

ARQHYS. Arquitectura de Norman Foster
<http://www.arqhys.com/contenidos/norman-arquitectura.html>

FOSTER + PARTNERS. Lista de proyectos
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/list/>

FOSTER + PARTNERS. Aeropuerto de Stansted
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/stansted-airport/>

ARQHYS. Aeropuerto de Londres-Stansted
<http://www.arqhys.com/articulos/aeropuerto-londres.html>

MEGACONSTRUCCIONES. Aeropuerto de Londres-Stansted
<http://megaconstrucciones.net/?construccion=aeropuerto-londres-stansted>

THE ARCHITECTURAL REVIEW. 1991 May: How it was built
<http://www.architectural-review.com/archive/1991-may-how-it-was-built/8614161.article>

07.02.02 | PELÍCULAS - VIDEOS

"Norman Foster chats to Living Paintings about Stansted Airport". Youtube
<https://www.youtube.com/watch?v=veTFEtTITXM&t=5s>

"How much does your building weigh, Mr. Foster?". Youtube
<https://www.youtube.com/watch?v=woHc6-Py3Mw&t=834s>

"Norman Foster Interview: Striving for Simplicity ". Youtube
<https://www.youtube.com/watch?v=hJNxgv9Rak0&t=548s>

"Aeropuerto de Stansted: Norman Foster". Retokommerling
<http://retokommerling.com/aeropuerto-stansted-norman-foster-foster-partners/>

07.02.03 | OTROS

Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Seguridad Estructural – Acciones en la edificación (CTE. DB SE-AE). *Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2009)*

Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Seguridad Estructural (CTE. DB SE). *Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2009)*

Software informático de cálculo y análisis estructural Architrave. *Universitat Politècnica de València. www.architrave.es*

08. ÍNDICE DE IMÁGENES

08.02 | NORMAN FOSTER

08.02.00 | PORTADA

https://dysonology.files.wordpress.com/2010/06/2595202964_14890719d7.jpg?w=422

08.02.01 | SIR NORMAN FOSTER

Imagen 02.01. Retrato de Sir Norman Foster
http://images.npg.org.uk/800_800/2/6/mw58726.jpg

08.02.02 | TRAYECTORIA PROFESIONAL

Imagen 02.02. Norman Foster, Richard Rogers y Carl Abbott en Yale (1962)
<http://www.srqmagazine.com/articles/396/Defending-a-Vulnerable-Art>
Imagen 02.03. Norman Foster y su esposa Wendy
<http://catalogo.artium.org/sites/default/files/imagenesbody/08/2013/20.jpg>
Imagen 02.04. Richard Rogers y Su Brumwell
<https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/64/d4/f3/64d4f3fb5ccf23da5daee96d09faf62f.jpg>
Imagen 02.05. Willis Faber & Dumas (1971-75)
<http://www.fosterandpartners.com/media/1710200/img0.jpg>
Imagen 02.06. Sainsbury Centre for Visual Arts (1974-78)
<http://www.fosterandpartners.com/media/Projects/0188/img0.jpg>
Imagen 02.07. HSBC (1979-86)
<http://www.fosterandpartners.com/projects/hongkong-and-shanghai-bank-headquarters/>
Imagen 02.08. Centro Renault (1980-82)
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/renault-distribution-centre/>
Imagen 02.09. Stansted Airport (1981-91)
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/stansted-airport/>
Imagen 02.10. Reichstag (1992-99)
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/reichstag-new-german-parliament/>
Imagen 02.11. Viaducto Millau (1993-2004)
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/millau-viaduct/>
Imagen 02.12. Torre Collserola (1998-2002)
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/torre-de-collserola/>
Imagen 02.13. London Town Hall (1998-2002)
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/1998/>
Imagen 02.14. Hearst Tower (2000-06)
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/hearst-tower/>
Imagen 02.15. Masdar City (2007-08)
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/masdar-development/>

08.02.03 | OBRAS DEL ARQUITECTO

Imágenes 02.16. Boceto - 02.17. Sección transversal - 02.18. Vista exterior
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/the-retreat/>
Imágenes 02.19. Bocetos - 02.20. Sección transversal - 02.21. Vista exterior
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/creek-vean/>
Imagen 02.22. Vista interior
<https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/736x/f2/73/5d/f2735d4008b4d23bbdde442012d00d04.jpg>
Imagen 02.23. Lucernarios
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/creek-vean/>
Imágenes 02.24. Sección axonométrica - 02.25. Sección transversal - 02.26. Lucernarios
[http://www.fosterandpartners.com/es/projects/jaffe-house-\(skybreak-house\)/](http://www.fosterandpartners.com/es/projects/jaffe-house-(skybreak-house)/)
Imagen 02.27. Vista interior
[http://www.fosterandpartners.com/es/projects/jaffe-house-\(skybreak-house\)/](http://www.fosterandpartners.com/es/projects/jaffe-house-(skybreak-house)/)
Imagen 02.28. Esquema estructural y constructivo - 02.29. Vista interior
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/reliance-controls/>
Imagen 02.30. Detalle del revestimiento metálico y de las riostras
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/reliance-controls/>
Imagen 02.31. Sección en perspectiva. Centro de recreación
BENEDETTI, A. (1995). *Norman Foster: Obras y proyectos*. Barcelona: Gustavo Gili S.A. [página 50]
Imagen 02.32. Sección y detalle del frente
http://archive.normanfosterfoundation.org/i18n/catalogo_imagenes/miniatura.do?idImagen=10001657
Imagen 02.33. Vista exterior
<https://www.architecture.com/image-library/imagecache/galleryitems/51263.1.434.434.FFFFFFFF.jpeg>
Imagen 02.34. Vista interior del túnel
<https://www.architecture.com/image-library/imagecache/galleryitems/51262.1.434.434.FFFFFFFF.jpeg>
Imágenes 02.35. Croquis y sección en perspectiva - 02.36. Mimetización con la naturaleza
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/ibm-pilot-head-office/>
Imagen 02.37. Vista interior
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/ibm-pilot-head-office/>
Imágenes 02.38. Planta y emplazamiento - 02.39. Cubierta-jardín - 02.40. Vista exterior nocturna
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/willis-faber-dumas-headquarters/>
Imágenes 02.41. Sección transversal - 02.42. Detalle instalaciones
<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/sainsbury-centre-for-visual-arts/>
Imagen 02.43. Detalle Fachada
<https://www.artfund.org/assets/supporting-museums/museum-of-the-year/2014/finalists/sainsbury1.jpg>
Imagen 02.44. Boceto inicial
<http://www.fosterandpartners.com/projects/hongkong-and-shanghai-bank-headquarters>

Imagen 02.45. Detalle de la estructura en fachada

http://farm5.static.flickr.com/4093/4771188849_a5b18ec9e6.jpg

Imagen 02.46. Vista interior

<http://www.fosterandpartners.com/projects/hongkong-and-shanghai-bank-headquarters/>

Imagen 02.47. Vista exterior

<http://catalogo.artium.org/dossieres/exposiciones/premios-pritzker-viaje-por-la-arquitectura-contemporanea/biografia-y-obra-2>

Imágenes 02.48. Planta modulada - 02.49. Sección - 02.50. Detalle del módulo estructural

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/renault-distribution-centre/>

Imagen 02.51. Vista exterior

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/renault-distribution-centre/>

Imágenes 02.52. Sección - 02.53. Módulo estructural - 02.54. Vista interior

<http://www.fosterandpartners.com/projects/stansted-airport/>

Imágenes 02.55. Boceto del entorno - 02.56. Planta - 02.57. Vista maqueta exterior

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/bbc-radio-centre/>

Imágenes 02.58. Planta modulada - 02.59. Alzado

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/carr%C3%A9-dart/>

Imagen 02.60. Vista exterior del espacio público - 02.61. Relación con la Maison Carrée

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/carr%C3%A9-dart/>

Imágenes 02.62. Boceto - 02.63. Relación entre nuevo y preexistencia

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/sackler-galleries-royal-academy-of-arts/>

Imágenes 02.64. Ascensor - 02.65. Escalera

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/sackler-galleries-royal-academy-of-arts/>

Imágenes 02.66. Vista exterior - 02.67. Boceto de la estructura en fachada - 02.68. Vista interior

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/century-tower/>

Imágenes 02.69. Sección constructiva - 02.70. Vista exterior

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/crescent-wing-sainsbury-centre-for-visual-arts/>

Imágenes 02.71. Boceto de relación con el exterior - 02.72. Planta - 02.73. Vista exterior

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/commerzbank-headquarters/>

Imágenes 02.74. Boceto - 02.75. Detalle de la cúpula - 02.76. Vista exterior

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/reichstag-new-german-parliament/>

Imágenes 02.77. Boceto - 02.78. Detalle constructivo - 02.79. Vista panorámica

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/millau-viaduct/>

Imágenes 02.80. Planta - 02.81. Detalle de la cubierta - 02.82. Espacio interior

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/great-court-at-the-british-museum/>

Imágenes 02.83. Planta - 02.84. Sala de conferencias - 02.85. Vista exterior

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/secc-conference-centre/>

Imágenes 02.86. Sección transversal | Soporte - 02.87. Detalle de la estructura

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/millennium-bridge/>

Imagen 02.88. Vista del Río Támesis

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/millennium-bridge/>

Imagen 02.89. Planta

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/30-st-mary-axe/>

Imagen 02.90. Esquema desviación del viento

<https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/736x/96/b0/70/96b070015c278fc1e48887b1418761c1.jpg>

Imágenes 02.91. Detalle del sistema de aberturas para la ventilación natural - 02.92. Vista exterior

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/30-st-mary-axe/>

Imágenes 02.93. Planta - 02.94. Espacio interior - 02.95. Vista exterior

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/1998/>

Imágenes 02.96. Vista exterior - 02.97. Sección con perspectiva - 02.98. Vista interior | Estructura

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/hearst-tower/>

Imágenes 02.99. Planta - 02.100. Sección

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/torre-caja-madrid-tower/>

Imagen 02.101. Planta | Flexibilidad de los espacios por los servicios e instalaciones en el arco

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/torre-caja-madrid-tower/>

Imagen 02.102. Vista exterior

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/torre-caja-madrid-tower/>

Imágenes 02.103. Bocetos - 02.104. Vista aérea

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/beijing-airport/>

Imágenes 02.105-02.108. Renderizados - 02.109. Vista aérea

<http://www.fosterandpartners.com/es/projects/masdar-development/>

08.03 | EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO

08.03.00 | PORTADA

FERNÁNDEZ-GALIANO, L. (2009). *Norman Foster: Drawings 1958-2008 Exhibition*. Madrid: *Ivorypress Arts + Books* [página 107]

FERNÁNDEZ-GALIANO, L. (2009). *Norman Foster: Drawings 1958-2008 Exhibition*. Madrid: *Ivorypress Arts + Books* [página 106]

08.03.01 | CONTEXTO HISTÓRICO

Imagen 03.01. Bombardero B-26 Marauder en Stansted (1944)

<http://www.taringa.net/posts/info/19669494/De-visita-por-el-Londres-de-la-Segunda-Guerra-Mundial.html>

Imagen 03.02. Avión de pasajeros Avo York con los hangares de Stansted al fondo (1955)

<https://abpic.co.uk/pictures/model/Avro%20685%20York%20C1/30/>

Imagen 03.03. Propuesta del Fun Palace de Cedric Price (1964)

<http://hlescolano.blogspot.com.es/2012/02/referenciasgrupofunpalace.html>

Imagen 03.04. Reliance Controls (1967)

FERNÁNDEZ-GALIANO, L. (2009). *Norman Foster: Drawings 1958-2008 Exhibition*. Madrid: *Ivorypress Arts + Books* [página 63]

Imagen 03.05. Modern Art Glass (1972-73)

BENEDETTI, A. (1995). *Norman Foster: Obras y proyectos*. Barcelona: *Gustavo Gili S.A.* [página 85]

Imagen 03.06. Sainsbury Centre for Visual Arts (1974-78)

AA.VV. (1992). *Norman Foster: A&V Monografías de Arquitectura y vivienda*, 38. Madrid: *Arquitectura Viva S.L.* [página 13]

08.03.02 | EMPLAZAMIENTO

Imagen 03.07. Relación Londres-Stansted

<https://www.bing.com/maps>

Imagen 03.08. Emplazamiento del Aeropuerto de Stansted

<https://www.bing.com/maps>

08.03.04 | IDEA

Imagen 03.09. Croquis preliminares donde se muestran los 3 requisitos fundamentales

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página 41]

Imagen 03.10. Propuestas y modificaciones

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [páginas 50-51]

08.03.06 | SEPARACIÓN POR NIVELES

Imagen 03.11. Croquis de los dos niveles y las relaciones entre ellos

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página 40]

08.03.07 | FORMA Y VOLUMEN

Imagen 03.12. Croquis de Foster en el que se ve la semejanza de la estructura con un árbol

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página 40]

Imagen 03.13. Detalle estructura y cubierta

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página 68]

08.03.08 | LA LUZ

Imagen 03.14. Vista interior del vestíbulo

<http://www.fosterandpartners.com/projects/stansted-airport/>

Imagen 03.15. Filtración de la luz diurna

<http://www.fosterandpartners.com/projects/stansted-airport/>

Imagen 03.16. Mitigación de la superficie oscura

https://www.e-architect.co.uk/images/jpgs/london/stansted_airport_aw010708_1.jpg

Imagen 03.17. Vista exterior nocturna. Se puede ver como la cubierta parece que flote

<http://www.fosterandpartners.com/projects/stansted-airport/>

08.03.09 | FLEXIBILIDAD

Imagen 03.18. Estación de tren ubicada en la planta inferior del aeropuerto

<http://www.fosterandpartners.com/projects/stansted-airport/>

08.03.10 | RELACIÓN CON LA NATURALEZA

Imagen 03.19. Vista aérea del aeropuerto

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página 56]

Imagen 03.20. vista a cota del suelo del aeropuerto

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página 65]

08.03.11 | DOCUMENTACIÓN GRÁFICA

Imagen 03.21. Planta aérea

<http://www.fosterandpartners.com/projects/stansted-airport/>

Imagen 03.22. Planta del vestíbulo principal

<http://www.fosterandpartners.com/projects/stansted-airport/>

Imagen 03.23. Planta del nivel de servicio y estación de ferrocarril

<http://www.fosterandpartners.com/projects/stansted-airport/>

Imagen 03.24. Planta primera del edificio satélite

<http://www.fosterandpartners.com/projects/stansted-airport/>

Imagen 03.25. Planta baja del edificio satélite

<http://www.fosterandpartners.com/projects/stansted-airport/>

Imagen 03.26. Alzado donde se ven las dos plantas

AA.VV. (1992). *Norman Foster: A&V Monografías de Arquitectura y vivienda*, 38. Madrid: *Arquitectura Viva S.L.* [página 13]

Imagen 03.27. Sección de las dos plantas y el sistema estructural

<http://www.fosterandpartners.com/projects/stansted-airport/>

08.03.12 | MATERIALIDAD Y CONSTRUCCIÓN

Imagen 03.28. Descomposición del sistema del árbol estructural

RINCÓN, A. (1999). *Norman Foster Obras seleccionadas y actuales de Foster and Partners*. Madrid: *Parainfo*. [página 49]

Imagen 03.29-03.31. Construcción de la estructura metálica antes de los elementos de hormigón (Verano de 1987)

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página 58]

Imagen 03.32. Vista de la estructura metálica con la cubierta ya dispuesta (Verano de 1987)

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página 61]

Imagen 03.33-03.36. Construcción de los elementos de hormigón ya finalizada (Principios de 1989)

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página 59]

Imagen 03.37. Esquema del contenedor de servicios

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página 78]

Imagen 03.38. Detalle de la cubierta ya terminada

THE ARCHITECTURAL REVIEW (1991). *AR 1991 May*. London: *EMAP Publishing Limited* [página 66]

Imagen 03.39. El interior de la terminal iluminada por el cerramiento y los lucernarios

THE ARCHITECTURAL REVIEW (1991). *AR 1991 May*. London: *EMAP Publishing Limited* [página 67]

Imagen 03.40. Detalle constructivo del encuentro del muro cortina con el forjado

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página 92]

Imagen 03.41. Detalle constructivo del encuentro del muro cortina con la cubierta

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página 90]

Imagen 03.42. Encuentro muro cortina y forjado

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página 92]

Imagen 03.43. encuentro muro cortina y cubierta

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página 92]

Imagen 03.44. Detalle constructivo del cerramiento del sótano

THE ARCHITECTURAL REVIEW (1991). *AR 1991 May*. London: *EMAP Publishing Limited* [página 68]

Imagen 03.45. Diferencia entre cerramientos

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página 93]

Imagen 03.46. Perspectiva axonométrica de las cabinas

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página 77]

Imagen 03.47. Vista exterior de la cabina

THE ARCHITECTURAL REVIEW (1991). *AR 1991 May*. London: *EMAP Publishing Limited* [página 69]

Imagen 03.48. Vista interior de la cabina

THE ARCHITECTURAL REVIEW (1991). *AR 1991 May*. London: *EMAP Publishing Limited* [página 69]

Imagen 03.49. Ejemplo de un mostrador de facturación del aeropuerto de Stansted

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página B73]

Imagen 03.50. Vista del interior de la estación de ferrocarril

http://www.wikiwand.com/en/Stansted_Airport_railway_station

Imagen 03.51. Alzado y sección en perspectiva del edificio satélite

AA.VV. (1992). *Norman Foster: A&V Monografías de Arquitectura y vivienda*, 38. Madrid: *Arquitectura Viva S.L.* [página 46]

Imagen 03.52. Vista interior del edificio satélite

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página 85]

Imagen 03.53. Lucernario

JENKINS, D. (2007). *Norman Foster Works 3*. London: *Prestel Publishing* [página 85]

08.04 | LA ESTRUCTURA

08.04.00 | PORTADA

<https://es.pinterest.com/pin/548102217123515279/>

08.04.01 | DESCRIPCIÓN GENERAL

Imagen 04.01. Dibujo del interior de la terminal

JENKINS, D. (2007). Norman Foster Works 3. London: Prestel Publishing [página 52]

Imagen 04.02. Dualidad constructiva y estructural

JENKINS, D. (2007). Norman Foster Works 3. London: Prestel Publishing [página 95]

08.04.02 | EL ÁRBOL ESTRUCTURAL

Imagen 04.03. Modelo 3D | Alzado de la estructura metálica

Elaboración propia mediante software informático Architrave

Imagen 04.04. Detalle de la unión de los tirantes

https://www.e-architect.co.uk/images/jpgs/london/stansted_airport_detail_02.jpg

Imagen 04.05. Árbol estructural

Elaboración propia mediante software informático Architrave

Imagen 04.06. Modelo 3D | Detalle de la cubierta

Elaboración propia mediante software informático Architrave

Imagen 04.07. Modelo 3D | Sistema arbóreo estructural

Elaboración propia mediante software informático Architrave

Imagen 04.08. Transmisión de cargas

Elaboración propia

Imagen 04.09. Estructura real

<http://www.fosterandpartners.com/projects/stansted-airport/>

Imagen 04.10. Estructura virtual

Elaboración propia mediante software informático Architrave

Imagen 04.11. Vista interior del vestíbulo

<http://www.fosterandpartners.com/projects/stansted-airport/>

Imagen 04.12. Modelo 3D | Cubierta y ramas

Elaboración propia mediante software informático Architrave

08.04.03 | EL FORJADO DEL VESTÍBULO

Imagen 04.13. Modelo 3D | Alzado de los dos tipos de estructura

Elaboración propia mediante software informático Architrave

Imagen 04.14. Planta sótano

<http://www.fosterandpartners.com/projects/stansted-airport/>

Imagen 04.15. Discretización de una geometría real a una modelización de elementos finitos
SOLER, V. (2015). *Trabajo final de grado | Análisis de la estructura del Museo de Arte Contemporáneo en Niteroi (O. Niemeyer)*. Valencia: Servicio Riunet UPV [página 36]

Imagen 04.16. Vista interior del sótano

<http://www.fosterandpartners.com/projects/stansted-airport/>

Imagen 04.17. Modelo 3D | Vista interior del sótano

Elaboración propia mediante software informático Architrave

08.04.04 | ASIGNACIÓN DE CARGAS

Imagen 04.18. Tabla C.5. Peso propio de elementos constructivos

CTE. DB SE-AE. *Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2009)* [página 24]

Imagen 04.19. Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso

CTE. DB SE-AE. *Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2009)* [página 9]

Imagen 04.20. Figura D.1. Valor básico de la velocidad del viento (V_b)

CTE. DB SE-AE. *Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2009)* [página 27]

Imagen 04.21. Tabla 3.4. Valores del coeficiente de exposición (c_e)

CTE. DB SE-AE. *Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2009)* [página 12]

Imagen 04.22. Tabla 3.5. Coeficiente eólico en edificios de pisos

CTE. DB SE-AE. *Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2009)* [página 12]

Imagen 04.23. Tabla 3.6. Coeficientes de presión interior

CTE. DB SE-AE. *Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2009)* [página 13]

08.04.05 | COMBINACIONES DE CARGAS

Imagen 04.24. Apartado 4.2.2. del CTE DB-SE

CTE. DB SE. *Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2009)* [páginas 15-16]

Imagen 04.25. Apartado 4.3.2. del CTE DB-SE

CTE. DB SE. *Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2009)* [página 18]

Imagen 04.26. Tabla 4.1. Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones

CTE. DB SE. *Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2009)* [página 17]

Imagen 04.27. Tabla 4.2. Coeficientes de simultaneidad (ψ)

CTE. DB SE. *Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2009)* [página 17]

08.05 | ANÁLISIS DE RESULTADOS

08.05.00 | PORTADA

<https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/236x/ee/ef/10/eeef101f41b80097a01a231e1e98ddad.jpg>

08.05.01 | DESCRIPCIÓN GENERAL

Imagen 05.01. Deformación del modelo sólido 3D
Elaboración propia mediante software informático Architrave

08.05.02 | SOLICITACIONES Y DIMENSIONADO

Imagen 05.02. Diagrama de axiles de la barra diagonal de la cubierta
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.03. Fallo de la barra por pandeo
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.04. Solución para el cumplimiento de la barra
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.05. Diagrama de axiles de la rama del árbol estructural
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.06. Diagrama de momentos de la rama del árbol estructural
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.07. Cumplimiento de la rama estructural
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.08. Diagrama de axiles del tirante
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.09. Diagrama de axiles del tramo inferior del soporte perteneciente al tronco estructural
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.10. Cumplimiento del tronco estructural
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.11. Diagrama de axiles del soporte de hormigón interior
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.12. Diagrama de momentos My del soporte de hormigón interior
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.13. Cumplimiento del soporte de hormigón con un diámetro de 1,20 m
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.14. Fallo del soporte de hormigón con un diámetro de 1,10 m
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.15. Mapa de color de momentos Mx
Elaboración propia mediante software informático Architrave

Imagen 05.15. Mapa de color de momentos Mx
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.16. Mapa de color de momentos My
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.17. Esquema de la relación entre el momento máximo y la dimensión del soporte
Elaboración propia
Imagen 05.18. Mapa de color de los momentos Mx representativos
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.19. Mapa de color de los momentos Mx representativos
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.20. Cálculo de la armadura necesaria
Elaboración propia mediante software informático Excel
Imagen 05.21. Planta tipo del ábaco de forjado reticular con casetones recuperables
<http://www.planoyescala.com/wp-content/uploads/2012/10/abaco-1.png>
Imagen 05.22. Sección tipo del ábaco de forjado reticular con casetones recuperables
<http://detallesconstructivos.cype.es/CYA7B3A.bmp>

08.05.03 | DEFORMACIONES DEL MÓDULO BÁSICO

Imagen 05.23. Mapa de color de los desplazamientos verticales Dz en ELS 01
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.24. Mapa de color de los desplazamientos verticales Dz en HIP 01
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.25. Mapa de color en 3D de los desplazamientos horizontales Dx en ELS 01
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.26. Deformación del modelo sólido 3D
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.27. Mapa de color de los desplazamientos verticales Dz en ELS 01
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.28. Mapa de color en 3D de los desplazamientos horizontales Dx en ELS 01
Elaboración propia mediante software informático Architrave

08.05.04 | DEFORMACIONES DEL MODELO DE NUEVE MÓDULOS

Imagen 05.29. Mapa de color de los desplazamientos verticales Dz en ELS 01
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.30. Mapa de color de los desplazamientos verticales Dz en HIP 01
Elaboración propia mediante software informático Architrave
Imagen 05.31. Mapa de color en 3D de los desplazamientos horizontales Dx en ELS 01
Elaboración propia mediante software informático Architrave

Imagen 05.32. Mapa de color en planta y alzado de los desplazamientos verticales en HIP 04

Elaboración propia mediante software informático Architrave

Imagen 05.33. Mapa de color de los desplazamientos verticales Dz en ELS 01

Elaboración propia mediante software informático Architrave

Imagen 05.34. Deformación del modelo sólido 3D

Elaboración propia mediante software informático Architrave

08.06 | CONCLUSIONES

Imagen 06.01. Vista interior de la estructura y la cubierta

<http://www.fosterandpartners.com/projects/stansted-airport/>

Imagen 06.02. Croquis de Foster en el que se ve la semejanza de la estructura con un árbol

JENKINS, D. (2007). Norman Foster Works 3. London: Prestel Publishing [página 40]

Imagen 06.03. Deformación del modelo sólido 3D

Elaboración propia mediante software informático Architrave

Imagen 06.04. Deformación horizontal y vertical provocada por la acción del viento

Elaboración propia mediante software informático Architrave