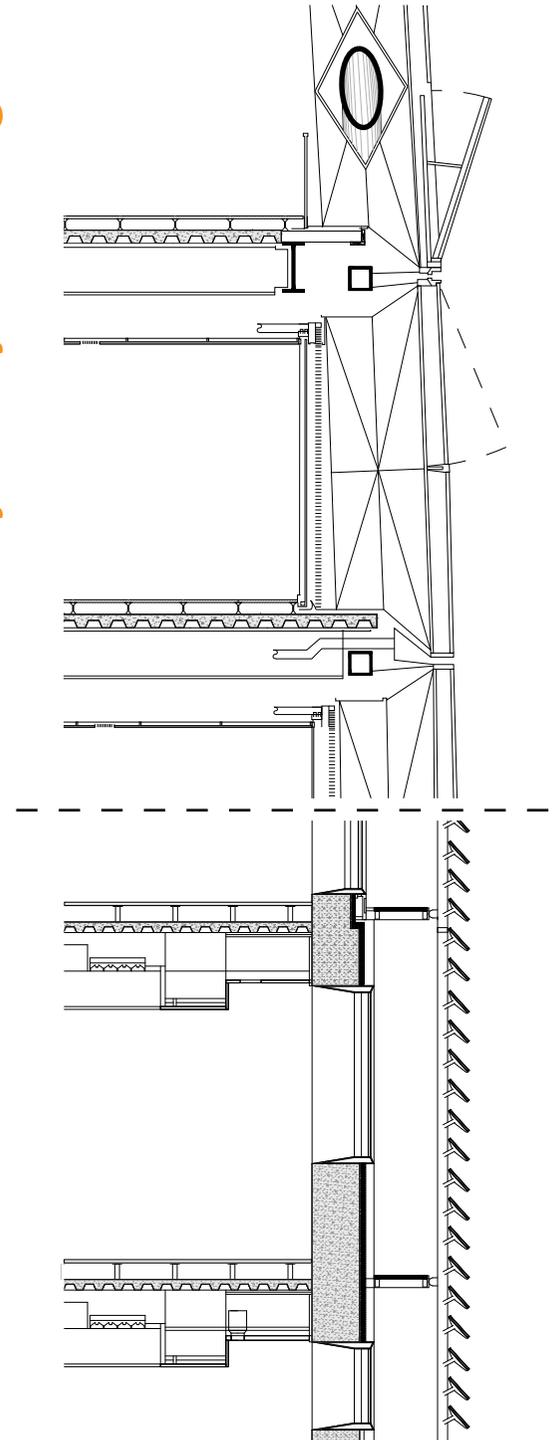


El potencial de la estructura en la composición arquitectónica

Caso de estudio edificio 30 St Mary Axe y torre Agbar



Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Arquitecta
Universidad Internacional del Ecuador - Facultad de arquitectura y urbanismo
Autora: Alisson Sofía Cabrera Ulloa Director: Mtr. Arq. Jaime Fernando Huanca



Escuela de
Arquitectura
UIDE | Powered by ASU

**EL POTENCIAL COMPOSITIVO DE LA ESTRUCTURA EN LA ARQUITECTURA
CASO DE ESTUDIO EDIFICIO 30 ST MARY AXE Y LA TORRE AGBAR**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Arquitecta

Autora:

Alisson Sofía Cabrera Ulloa

Director:

Mtr. Arq. Jaime Fernando Huanca

Loja - Ecuador 2020

Dedicatoria

Todos mis logros siempre están y estarán dedicados a mi mayor ejemplo, a Dios, porque sin el en mi vida nada de esto sería posible.

A mi familia, por su amor y apoyo incondicional que me ha impulsado a lograr todo lo que me proponga.

A mis amigos y todos quienes siempre estuvieron a mi lado en este proceso de estudio y me han animado a seguir y perseverar para poder alcanzar mis objetivos.

Alisson Cabrera

Agradecimiento

No existen palabras suficientes para agradecer al arquitecto del Universo, por regalarme la vida y desde aquel momento ser mi guía y fortaleza en este camino.

A mis padres, porque todos mis logros son gracias a ellos, al sacrificio, amor, apoyo y confianza que han puesto en mí, convirtiéndome en la persona y profesional que hoy soy.

A mi familia y amigos que me llenan cada día de energía, alegría, motivación y perseverancia.

A mis profesores por la guía y enseñanzas que han impartido en mi formación ética y profesional.

A todos ustedes mi amor y agradecimiento.

Alisson Cabrera

Resumen

Las posibilidades que tiene la estructura en la actualidad no tiene límites gracias al extraordinario desarrollo tecnológico y constructivo que se ha venido dando desde el siglo XIX, en este nuevo contexto el papel de la estructura en el proyecto se ha modificado, por lo que en la presente investigación se explora el potencial que tiene la estructura para enriquecer la obra arquitectónica dentro de esta nueva libertad formal, incitando a estudiantes de arquitectura a participar de manera más activa en el diseño estructural. Para justificar el potencial compositivo y formal de la estructura en la arquitectura se realiza un análisis en tres niveles.

La investigación parte del estudio de los antecedentes históricos de la relación entre la arquitectura y la estructura, para luego analizar el potencial de la estructura a través de cuatro estrategias de diseño estructural desde un enfoque compositivo y formal (la estructura

como elemento compositivo espacial, alteración y distorsiones de la estructura, estructuras optimizadoras y envolvente estructural).

Para finalizar se plantea un último análisis comparativo entre el edificio 30 St Mary Axe y la Torre Agbar generando un contraste entre las diferentes conceptualizaciones de la estructura en proyectos de características similares a fin de valorar las interrelaciones entre arquitectura y estructura.

Palabras claves: diseño estructural, estructura en arquitectura, análisis estructural, 30 St Mary Axe, Torre Agbar.

Abstract

Days have no limits thanks to the extraordinary technological and constructive development that has been taking place since the 19th century, in this new context architecture is directly related through the structural role in the project, so in This research explores the potential of the structure to enrich the architectural work within this new formal freedom, encouraging architecture students to participate more actively in structural design. To justify the compositional and formal potential of the structure in architecture, a three-level analysis is carried out.

The research starts from the study of the historical antecedents of the relationship between architecture and structure, to then analyze the power of the structure through four structural design strategies from a compositional and formal approach (the structure as a spatial compositional element, alteration and distor-

tions of the structure, optimizing structures and structural envelope).

Finally, a final comparative analysis is proposed between the 30 St Mary Ax building and the Agbar Tower, generating a contrast between the different conceptualizations of the structure in projects with similar characteristics in order to assess the interrelationships between architecture and structure.

Keywords: structural design, structure in architecture, structural analysis, 30 Sr Mary Ax, Torre Agbar.

Capítulo

01

Relación entre arquitectura y estructura a través de la historia

Resumen

Abstrac

Introducción

Problemática

Justificación

Objetivos

Metodología

10	1.1. Edad antigua	42
12	1.1.1. Arquitectura egipcia	42
28	1.1.2. Arquitectura griega	47
30	1.1.3. Arquitectura romana	53
32	1.2. Edad media	59
34	1.2.1. Arquitectura bizantina	59
36	1.2.2. Arquitectura románica	63
	1.2.3. Arquitectura gótica	67
	1.3. Edad moderna	74
	1.3.1. Arquitectura renacentista	74
	1.3.2. Arquitectura barroca	77
	1.3.3. Arquitectura rococó	78
	1.3.4. Arquitectura neoclásica	80
	1.4. Edad contemporánea	84
	1.4.1. Arquitectura romántica	84
	1.4.2. Arquitectura industrial	86
	1.4.3. Arquitectura moderna	88

Capítulo 02

Capítulo 03

Estrategias generales de diseño estructural

2.1. La estructura como elemento compositivo espacial	98
2.1.1. Disposición de la estructura en el espacio	99
2.1.1.1. Retículas regulares	99
2.1.1.2. Retícula irregular	104
2.2. Alteración y distorsiones de la estructura	113
2.3. Estructuras optimizadoras	117
2.4. Envoltente estructural	125
2.4.1. Envoltentes estructurales para edificios en altura	126
2.4.2.1. Pórticos triangulados	127
2.4.2.2. Estructuras tubulares	127
2.4.2.3. Estructuras de retícula diagonal (diagrid)	128
2.4.2.4. Estructuras de tubo triangulado	128
2.4.2.5. Haz de tubos	129
2.4.2.6. Retícula espacial	130
2.4.2. Entramados como envoltente estructural	132

Análisis comparativo entre el edificio 30 St Mary Axe y la Torre Agbar

3.1. Identificación y selección de los proyectos a analizar	138
3.2. Análisis de edificio 30 St Mary Axe	145
3.2.1. Contexto y emplazamiento	145
3.2.2. Ideas conceptuales	151
3.2.3. Forma y volumen	154
3.2.4. Diseño	157
3.2.4.1. Estrategias	157
3.2.4.2. Estructura del espacio	161
3.2.4.3. Fachada	170
3.2.5. Estructura	174
3.2.5.1. Sistema estructural	174
3.2.5.2. Construcción	178
3.2.5.3. Integración de la estructura en el proyecto	182
3.2.5.4. Valor compositivo y formal	184
3.3. Análisis de la Torre Agbar	188
3.3.1. Contexto y emplazamiento	188
3.3.2. Ideas conceptuales	193

3.3.3. Forma y volumen	194
3.3.4. Diseño	195
3.3.4.1. Estrategias	195
3.3.4.2. Estructura del espacio	201
3.3.4.3. Fachada	210
3.3.5. Estructura	214
3.3.5.1. Sistema estructural	214
3.3.5.2. Construcción	220
3.3.5.3. Integración de la estructura en el proyecto	224
3.3.5.4. Valor compositivo y formal	228
3.4. Análisis comparativo entre el edificio 30 St Mary Axe y la Torre Agbar	229
3.4.1. Ideas conceptuales	229
3.4.2. Forma y volumen	229
3.4.3. Estrategias de diseño	229
3.4.4. Estructura del espacio	230
3.4.5. Fachada	230
3.4.6. Estructura	230

Conclusiones	238
Recomendaciones	240
Bibliografía	242

Índice de Figuras

Figura 1. Metodología de investigación	39
Figura 2. Esfuerzo al que está sometido en dintel	42
Figura 3. Templo de Khonsu, Karnak, Tebas (Egipto)	43
Figura 4. Templo del Valle, pirámide de Kefrén, Gizeh	44
Figura 5. Sección por la sala hipóstila del templo de Karnak	45
Figura 6. Columnas de la sala hipóstila, templo de Karnak	45
Figura 7. Templo Dendera	46
Figura 8. Simbolismo en la estructura, Templo Dendera	46
Figura 9. Columna, acción y reacción	47
Figura 10. Planta del Partenón de Atenas	48
Figura 11. Perspectiva del Partenón de Atenas	48
Figura 12. Clasificación del Templo Griego según la configuración del peristilo	49
Figura 13. Clasificación del Templo Griego según la proporción del intercolumnio	49
Figura 14. Clasificación del Templo Griego según el orden	50
Figura 15. Proporciones del Partenón	51
Figura 16. El Partenón de Atenas	52
Figura 17. Elevación frontal del Partenón de Atenas	52
Figura 18. Relación de distribución de cargas entre un dintel y un arco	53
Figura 19. Empuje lateral que ejerce una bóveda de cañón	54
Figura 20. Planta y sección del Panteón de Roma	55
Figura 21. Arcos ocultos en la masa de la estructura	55

Figura 22. Arcos de descarga del muro cilindrico en fachada	56
Figura 23. Estructura interna del Panteón	56
Figura 24. Fachada del Coliseo Romano	58
Figura 25. Estructura del Coliseo Romano	58
Figura 26. Planta y sección, Santa Sofía	60
Figura 27. Estructura de Santa Sofía	61
Figura 28. Interior de la Basílica de Santa Sofía	61
Figura 29. Nave lateral de Santa Sofía	62
Figura 30. Distribución de cargas en arcos fajones	63
Figura 31. Evolución hacia la bóveda de aristas	64
Figura 32. Sección transversal de Saint Sernin de Toulouse	65
Figura 33. Saint Sernin de Toulouse	66
Figura 34. Sección axonométrica de Saint-Sernin de Toulouse	66
Figura 35. Distribución de las cargas en el arco apuntado	67
Figura 36. Bóveda de crucería	68
Figura 37. Trabajo de las estructuras góticas	69
Figura 38. Interior de la Catedral Notre Dame, Paris	70
Figura 39. Sección axonométrica de la Catedral Notre Dame	70
Figura 40. Planta de la Catedral Notre Dame	71
Figura 41. Catedral Notre Dame, Paris	71
Figura 42. Iglesia de San Lorenzo, Florencia, Italia	74

Figura 43. Planta de la Iglesia de San Lorenzo	74
Figura 44. Palacio Rucellai	76
Figura 45. Decoración en fachada del Palacio Rucellai	76
Figura 46. San Carlos de las Cutro Fuentes	78
Figura 47. Planta de San Carlos de las Cutro Fuentes	78
Figura 48. Planta de la Basílica de Vierzehnhwiligen	79
Figura 49. Interior de la Basílica de Vierzehnhwiligen	79
Figura 50. Sección de la Basílica de Vierzehneiligen	80
Figura 51. Interior del Panteón de Paris	81
Figura 52. Panteón de Paris	82
Figura 53. Planta del Panteón de Paris	82
Figura 54. Palacio de Westminster	85
Figura 55. Palacio de Cristal	87
Figura 56. Sistema Dom-ino de Le Corbusier	89
Figura 57. Villa Savoye	89
Figura 58. Edificio 30 St Mary Axe	91
Figura 59. Línea de tiempo del papel de la estructura en la historia de la arquitectura	92
Figura 60. Selección de las estrategias de diseño estructural	96
Figura 61. Estrategias de diseño estructural	97
Figura 62. Retículas regulares	99
Figura 63. Columnas de las oficinas de Johnson Wax	100

Figura 64. Sala de conferencias de ka Staatsgalerie	101
Figura 65. Columnas del Aeropuerto de Stuttgart	102
Figura 66. Ejemplos de retículas regulares en la arquitectura	103
Figura 67. Retículas irregulares	104
Figura 68. Disposiciones irregulares	105
Figura 69. Contraste de geometrías	106
Figura 70. Contraste de orientaciones	108
Figura 71. Columnas del Crematorio Baumschulenweg	109
Figura 72. Columnas de la Galería Kunsthal	110
Figura 73. Interior de la Biblioteca de la Universidad de Tama	111
Figura 74. Ejemplos de retículas irregulares en la arquitectura	112
Figura 75. Capiteles de luz, Crematorio Baumschulenweg	113
Figura 76. Eapacio interior de lasTermas de Vals	114
Figura 77. Casa de Burdeos	115
Figura 78. Ejemplos de alteración y distorsiones de la estructura en la arquitectura	116
Figura 79. Clasificación de los elementos estructurales	117
Figura 80. Catenaria y parábola en la arquitectura	119
Figura 81. Tipos de curvatura	120
Figura 82. Área de servicio de la autopista Deitingen sur, Heinz Isler	121
Figura 83. L'Oceanografic	122
Figura 84. Hipodromo de la Zarzuela	123

Figura 85. Ejemplos de estructuras optimizadoras en la arquitectura	124
Figura 86. Comportamiento de los edificios en altura	125
Figura 87. Envoltentes estructurales para edificios en altura	126
Figura 88. Torre Hearst, Nueva York	128
Figura 89. Torre Hancock en Chicago	129
Figura 90. Banco de China en Hong Kong	130
Figura 91. Ejemplos de envoltentes estructurales para edificios en altura en la arquitectura	131
Figura 92. Edificio para la tienda TOD'S	133
Figura 93. Ejemplos de entramados como envoltente estructural en la arquitectura	134
Figura 94. Listado de obras arquitectónicas	139
Figura 95. Clasificación 1 según el año del proyecto	140
Figura 96. Clasificación 2 según el programa del proyecto	141
Figura 97. Clasificación 3 según el volumen y la figura del proyecto	142
Figura 98. Generalidades de los proyectos seleccionados	143
Figura 99. Puntos para el análisis de los edificios	144
Figura 100. Ubicación del edificio 30 St Mary Axe	145
Figura 101. Consolidación del Clúster de edificios altos de la Ciudad de Londres	148
Figura 102. Vistas protegidas de Londres	150
Figura 103. Ideas conceptuales del proyecto 30 St Mary Axe	151
Figura 104. Volumetría del edificio 30 St Mary Axe	154
Figura 105. Influencia del viento en la volumetría del edificio 30 St Mary Axe	155

Figura 106. Emplazamiento del edificio 30 St Mary Axe	156
Figura 107. Limitaciones del sitio, edificio 30 St Mary Axe	156
Figura 108. Diseño de forjados del edificio 30 St Mary Axe	157
Figura 109. Pozos en las plantas del edificio 30 St Mary Axe	158
Figura 110. Iluminación y ventilación gracias a los forjados, edificio 30 St Mary Axe	158
Figura 111. Ventilación en planta, edificio 30 St Mary Axe	159
Figura 112. Iluminación y ventilación natural en fachada, edificio 30 St Mary Axe	159
Figura 113. Diseño de la plaza del edificio 30 St Mary Axe	160
Figura 114. Distribución de las plantas y corte del edificio 30 St Mary Axe	162
Figura 115. Identificación de la estructura en las plantas del edificio 30 St Mary Axe	163
Figura 116. Identificación de los espacios en las plantas del edificio 30 St Mary Axe	164
Figura 117. Circulación vertical del edificio 30 St Mary Axe	166
Figura 118. Circulación en base a la estructura del edificio 30 St Mary Axe	167
Figura 119. Circulación y accesos del edificio 30 St Mary Axe	168
Figura 120. Composición de la fachada del edificio 30 St Mary Axe	171
Figura 121. Fachada del edificio 30 St Mary Axe	172
Figura 122. Composición de la estructura, edificio 30 St Mary Axe	174
Figura 123. Estructura Diagrid, edificio 30 St Mary Axe	175
Figura 124. Esquema de los nodos en la estructura Diagrid	176
Figura 125. Estructura del núcleo, edificio 30 St Mary Axe	177
Figura 126. Composición del edificio 30 St Mary Axe	180

Figura 127. Relación entre las ideas conceptuales, el diseño y la estructura, edificio 30 St Mary Axe	182
Figura 128. Fotografías del edificio 30 St Mary Axe	186
Figura 129. Ubicación de la Torre Agbar	188
Figura 130. Extensión horizontal de Barcelona, Torre Agbar	192
Figura 131. Los tres edificios más altos del área metropolitana de Barcelona	192
Figura 132. Ideas conceptuales del proyecto Torre Agbar	193
Figura 133. Forma y volumen de la Torre Agbar	195
Figura 134. Muro y recubrimiento de la Torre Agbar	196
Figura 135. Esquema de la idea de desmaterialización en fachada de la Torre Agbar	198
Figura 136. Iluminación y ventilación natural en fachada, Torre Agbar	199
Figura 137. Esquema de la concepción de la Torre Agbar como un geiser	200
Figura 138. Distribución de las plantas y corte de la Torre Agbar	202
Figura 139. Identificación de la estructura en las plantas de la Torre Agbar	202
Figura 140. Identificación de los espacios en las plantas de la Torre Agbar	204
Figura 141. Circulación vertical de la Torre Agbar	206
Figura 142. Circulación en base a la estructura de la Torre Agbar	207
Figura 143. Circulación y accesos de la Torre Agbar	208
Figura 144. Composición de la fachada de la Torre Agbar	211
Figura 145. Fachada de la Torre Agbar	212

Figura 146. Composición de la estructura, Torre Agbar	215
Figura 147. Estructura de la Torre Agbar	216
Figura 148. Estructura de la Torre Agbar, vigas	218
Figura 149. Estructura de la cúpula de la Torre Agbar	219
Figura 150. Composición de la Torre Agbar	222
Figura 151. Relación entre las ideas conceptuales, el diseño y la estructura, Torre Agbar	224
Figura 152. Fotografías de la Torre Agbar	226
Figura 153. Cuadro comparativo del edificio 30 St Mary Axe y la Torre Agbar	232
Figura 154. Premios otorgados al edificio 30 St Mary Axe y la Torre Agbar	235

Introducción

La estructura está formada por planos, por soportales aislados o por una combinación de ambos que el diseñador puede utilizar intencionalmente para reforzar o materializar ideas. En este contexto, los pilares, los muros y las vigas pueden entenderse en función de conceptos como frecuencia, trazado, simplicidad, regularidad, aleatoriedad y complejidad. Como tal, la estructura puede utilizarse para definir el espacio, crear unidades, articular la circulación, sugerir el movimiento o desarrollar la composición y las modulaciones. De este modo la estructura queda ligada de modo inextricable a los propios elementos que crean la arquitectura, su cualidad y su emoción. (Clark & Pause, 1997, pág. 3)

Roger Clark y Michael Pause en esta cita

mantienen una postura positiva frente a la relación esencial que tiene la estructura en la arquitectura; por el contrario Charleson (2007) afirma “en el día a día, nuestra experiencia de las estructuras puede describirse muchas veces como poco memorable. En buena parte de nuestro entorno construido, la estructura esta oculta o es anodina” (p. 15).

A partir de aquí surge la interrogante si verdaderamente ¿Puede la estructura desarrollar un papel activo en la composición de un proyecto arquitectónico? ¿Y de qué manera los arquitectos pueden aprovechar el potencial de la estructura dentro de la arquitectura?

Son en base a estas preguntas que se desarrolla esta investigación con el fin de valorar la importancia que tiene la estructura en la arquitectura.

Problemática

La estructura es uno de los componentes más importantes de la arquitectura y es inherente a la misma, sin embargo, al tratarse de un tema tan grande y complejo requiere de un estudio especializado, el cual se aparta del estudio de la arquitectura para profundizar en aspectos técnicos, en donde los arquitectos ya no se involucran. Pero todo esto no siempre fue así, anteriormente la figura del arquitecto tenía un perfil más amplio, era artista, proyectista y constructor, pero con la fundación de la Escuela Politécnica (1805) por parte de Napoleón, esto cambio surgiendo la nueva profesión de ingenieros, lo que conlleva a la reagrupación de los arquitectos en la Escuela Real de Bellas Artes (1816) dando inicio a una desvinculación por parte de los arquitectos hacia temas estructurales, ejerciendo una práctica arquitectónica más específica de tipo artística, que con los años se ha ido extendiendo a lo largo del mundo (Toca, 2015).

Esta visión que se tiene sobre la estructura como un componente meramente técnico destinado únicamente a los ingenieros, parte de dicha formación profesional. Hoy en día, la estructura por lo general como se acostumbra a tratar y enseñar en muchas escuelas de arquitectura, se plantea como una malla homogénea de columnas con un ritmo constante que se acopla con la geometría y distribución del proyecto para que no interfiera en los espacios diseñados, quedando prácticamente oculta y pasando desapercibida; ocasionando una desconexión y desinterés en los estudiantes, ya que, no se le da la importancia que amerita enseñar temas de diseño estructural; lo que puede llegar a resultar en proyectos con propuestas banales y vacías, además de repetitivas y poco innovadoras de contenido si no se integra a la estructura desde un principio.

Si bien es cierto, el diseño estructural lo reali-

zan los ingenieros estructurales, sin embargo, la forma general de la estructura está directamente relacionada con el diseño del edificio que sostiene, por lo tanto, se encuentra determinada principalmente por los arquitectos. De aquí se plantea la cuestión de hasta qué punto el arquitecto debe involucrarse en consideraciones estructurales al determinar la forma y disposición general de un edificio.

El estudio de Abby Suckle sobre diez arquitectos de primera línea indica que estos deciden la forma del edificio después de considerar un amplio abanico de factores que normalmente no incluyen la estructura en primera instancia (...) La autora encuentra que mientras la intensidad y la importancia de la idea inicial del proyecto varía en gran medida de un arquitecto a otro, los aspectos estructurales nunca son

prioritarios en las fases iniciales del proyecto a la hora de determinar la volumetría del edificio. (Charleson, 2007, p. 37)

“Es posible decir, por tanto, que al menos algunos arquitectos, han considerado factible ignorar las consideraciones estructurales cuando inventan la forma de un edificio, creyendo que una preocupación por las cuestiones técnicas inhibe el proceso de diseño creativo” (Macdonald, 1997, p. 24).

Por todo esto se considera necesario exponer el potencial compositivo de la estructura en la arquitectura mediante el contraste de dos reconocidas obras arquitectónicas, debido a que la forma en que se lleva a cabo la resolución estructural, influye directamente en el diseño y en el éxito de una obra arquitectónica.

Justificación

Desde finales del siglo XX y el comienzo del XXI se han producido extraordinarias innovaciones y avances tecnológicos junto con la mejora de las propiedades de los materiales estructurales; la arquitectura, por lo tanto, está actualmente en una posición de total libertad formal, abriendo un abanico de posibilidades para la estructura. (Bernabeu, 2007)

La estructura tiene una contribución arquitectónica que va más allá de su función primaria de resistir cargas, añade al proyecto otra capa de valores funcionales y estéticos, aumenta el interés en los edificios y su disfrute, mejora su funcionalidad y eleva el ánimo de sus ocupantes. (Charleson, 2007)

Precisamente porque la estructura es imprescindible en la construcción de la arquitectura, no tiene por qué pasar desapercibida y mucho

menos ser ignorada. En este sentido, se busca principalmente que los estudiantes despierten su interés por ampliar su experiencia sobre la estructura en el diseño; incitando a que los proyectos arquitectónicos adopten soluciones estructurales que actúen las ideas conceptuales arquitectónicas, partiendo de la noción de que la estructura cuenta con ilimitadas oportunidades que aportan valor y enriquecen la obra arquitectónica, todo esto mediante la síntesis del papel compositivo de la estructura en la historia de la arquitectura, una exposición de estrategias de diseño estructural reflejadas en obras arquitectónicas con aportaciones positivas de la estructura y el contraste del papel compositivo de la estructura de dos proyectos de características similares.

Por otra parte, los textos sobre estructuras destinados a estudiantes de arquitectura tienden a enfocarse en aspectos técnicos y pocas

son las veces que presentan estudios sobre las aplicaciones arquitectónicas de la estructura; así como los textos de arquitectura sobre proyectos que analizan los elementos arquitectónicos, entre los que se encuentra la estructura, pero que sin embargo casi nunca ofrecen información sobre su contribución a la arquitectura.

Dicho esto, debido a la escasez de material escrito sobre el papel de la estructura en la composición arquitectónica; la presente investigación servirá como texto de referencia de ideas para proyectos arquitectónicos y contribuirá con un análisis crítico en base a la comparación de dos obras similares y de gran importancia en la arquitectura como son la Torre Agbar de Jean Nouvel y el edificio 30 St Mary Axe de Norman Foster para la reflexión y puesta en valor del potencial compositivo y formal de la estructura en la arquitectura.

Objetivos

Objetivo general

Exponer una visión global del potencial que tiene la estructura en la concepción y desarrollo de la arquitectura por medio del contraste entre el edificio 30 St Mary Axe y la Torre Agbar, para llegar a valorar el papel compositivo de la estructura en la arquitectura.

Objetivos específicos

- 1.** Definir el marco histórico de la estructura en la arquitectura, a fin de establecer una serie de referencias que ayuden a la comprensión del papel compositivo y formal de la estructura en una obra arquitectónica.
- 2.** Analizar las principales estrategias de diseño estructural en donde la estructura participa de manera activa en la concepción de un proyecto arquitectónico, con el propósito de exponer la importancia de la estructura en la composición de la arquitectura.
- 3.** Valorar el potencial de la estructura mediante el análisis y contraste del edificio 30 St Mary Axe con la Torre Agbar, para establecer un análisis crítico que destaque el papel compositivo que posee la estructura en la arquitectura.

Metodología

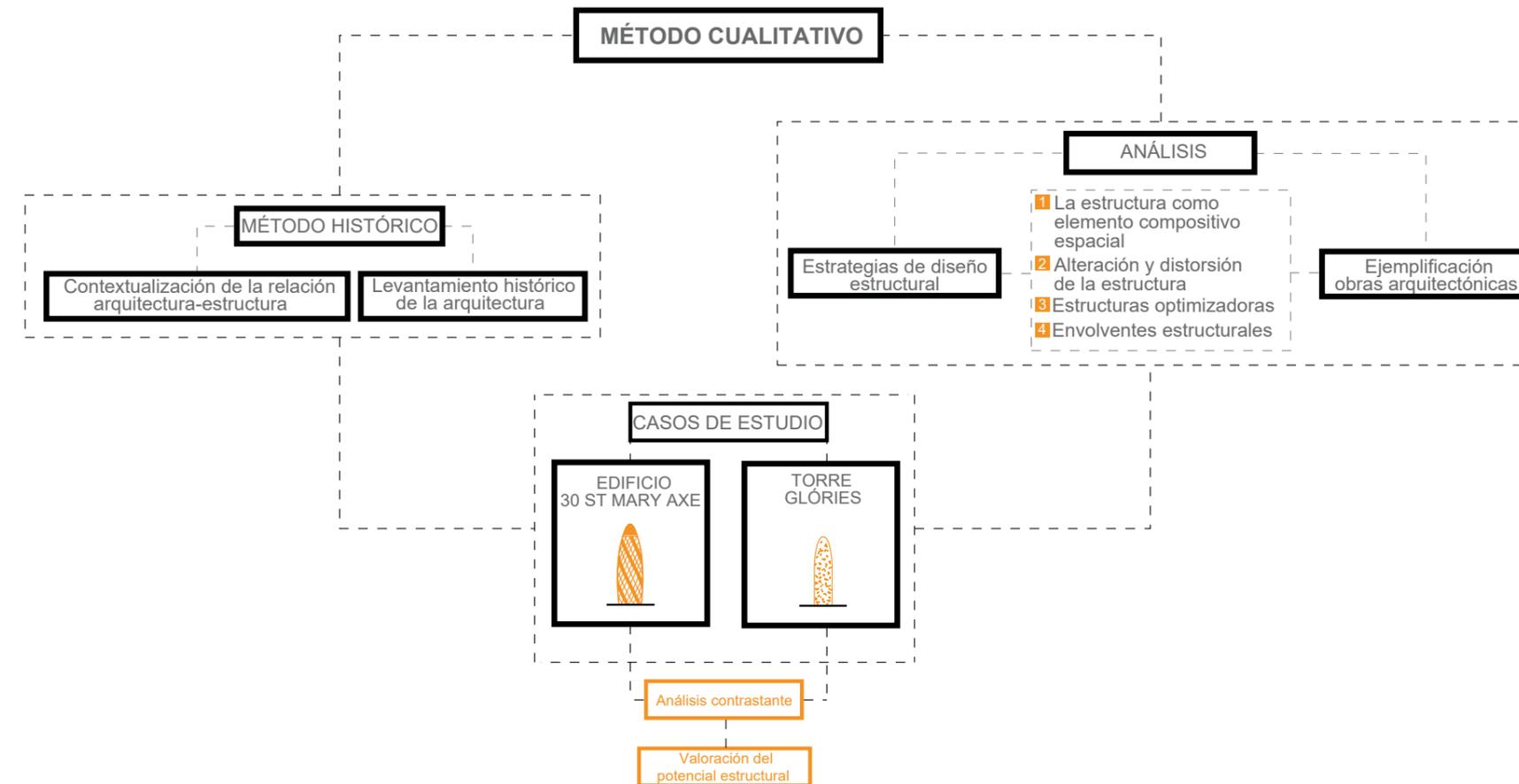
El diseño de esta investigación en general tiene un enfoque cualitativo y se desarrolla en tres etapas, las mismas que corresponden a los tres objetivos específicos:

Primera etapa: Mediante el método histórico la tesis inicia con un estudio razonado de los antecedentes históricos de la relación y evolución entre arquitectura y estructura, mediante la recopilación de fuentes de información secundaria como libros, revistas, papers, artículos (información de la web, etc.).

Segunda etapa: Se analizan cuatro estrategias principales de diseño estructural que participan de manera activa en la concepción de las formas libres de la arquitectura contemporánea, mediante bases teóricas y ejemplos de aportaciones positivas de obras arquitectónicas.

Tercera etapa: A partir de este estudio razonado del método comparativo, se plantea el tercer nivel de análisis entre el edificio 30 St Mary Axe y la Torre Agbar; análisis que tiene como punto focal a la estructura en cada uno de los aspectos de la composición arquitectónica con el propósito de valorar el potencial compositivo de la estructura en la arquitectura, mediante el contraste del análisis de casos de estos dos proyectos.

Figura 1
Metodología de investigación



Capítulo 01

Relación entre arquitectura y estructura a través de la historia

1.1. Edad antigua

1.1.1. Arquitectura egipcia

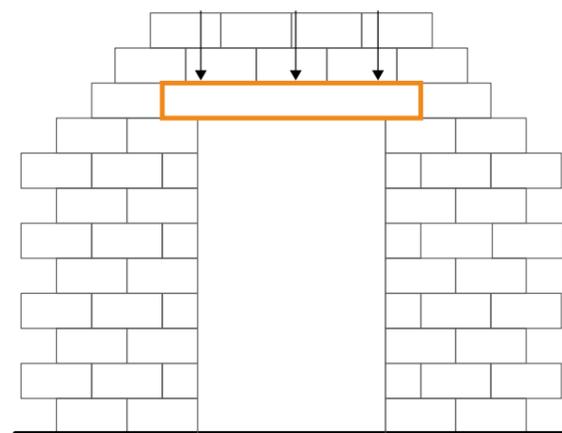
El carácter de las construcciones en Egipto siempre se halló bajo las condiciones climáticas y geográficas del sentido lineal del Valle del Nilo, que fue formando la arquitectura de esta civilización por la necesidad de construir viviendas y palacios haciendo uso de materiales del medio, como el tapial grueso y compacto, elaborado con fango del Nilo fuertemente apisonado o más tarde con piezas de adobe; que llegaron a conformar grandes bloques de masa térmica como estructuras de muros portantes en forma de escarpa o talud, característico de la arquitectura egipcia; como afirma Torroja (2010) “el muro pide ancho creciente hacia abajo, puesto que es allí donde el momento volcador es mayor. Esto conduce al perfil trapecial con talud en el paramento, al que tan noble aspecto supieron dar los arquitectos egipcios” (p. 90).

Para poder abrir vanos en los anchos muros utilizaron el dintel como elemento estructural de soporte en puertas y ventanas. “Cualquier abertura en los muros de carga tendrá limitaciones de tamaño y localización, con el fin de no debilitar la integridad estructural del muro” (D. K. Ching, 2009, p. 140).

El origen de la estructura es el muro, sea de piedra, de ladrillo, de adobe o de cualquier otro material. Pero una habitación totalmente rodeada de muros no tiene luz ni vistas, luego es necesario abrir huecos. Para abrir un hueco, es preciso sostener los bloques o ladrillos que hay encima de él, y ello se consigue mediante una viga (de madera, o de metal a partir de 1750) o un arco. Esa viga que se inserta en el muro para sostener la pared de arriba se llama dintel. (M. Roth, 1999, p. 22)

El dintel monolítico, sobre dos pilastras o sobre las jambas del muro ciclópeo, es el primer triunfo del humano constructor para salvar un vano con caracteres de permanencia en su obra. Él no sabía que aquello trabajaba a flexión, no conocía a Galileo, a Euler, a Navier ni a St. Venant. (Torroja, 2010, p. 123)

Figura 2
Esfuerzo al que está sometido el dintel



Para la edificación de los grandes templos los elementos estructurales fueron de piedra. Egipto es un país donde abunda la piedra de construcción de toda clase, la utilización de esta como material constructivo fue tardía, pero con el tiempo se volvió un material habitual en las edificaciones religiosas, llegando a considerarse un invento propio de los egipcios, lo que supuso una gran revolución constructiva en aquellos tiempos.

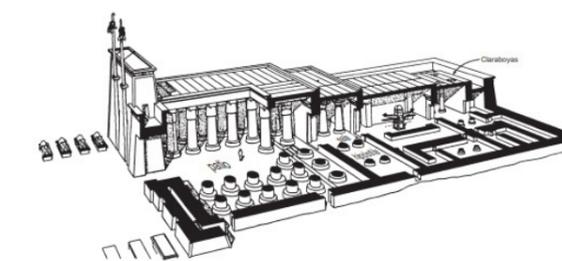
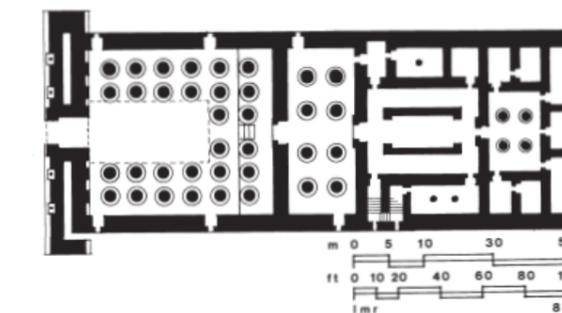
La arquitectura de los templos se caracteriza por su desarrollo longitudinal simétrico axial, compuesta con un muro perimetral de carga en talud y estructura porticada de pilares o columnas y vigas o dinteles; conocida como adintelada o arquitrabada.

Los egipcios además del muro también usaron la columna como elemento estructural sobre todo en los templos, Louis I. Kahn (1957) se

refirió al trascendental momento en que se rompió la pared y nació la columna; tomando como ejemplo lo mencionado anteriormente sobre las aberturas de ventanas y puertas en los gruesos muros, logradas mediante la utilización del dintel; la pared o los muros también podrían llegar a eliminarse, por decirlo de alguna manera, abriendo un gran vano que conserve únicamente delgados laterales dando paso a la conformación de columnas, como el soporte vertical de la edificación.

El arquitecto Imhotep realiza el ejemplo más evidente de este sistema arquitrabado en el Templo del Valle (2570 - 2500 a.C.), al este de la pirámide de Kefrén, en Gizeh, mostrando a la estructura tal cual es, estilísticamente abstracta, sin maquillar su papel portante, donde la sección cuadrada de los grandes y pesados dinteles tallados en piedra (granito rojo), descansan sobre los pilares de iguales carac-

Figura 3.
Templo de Khonsu, Karnak, Tebas (Egipto)



Nota. Planta y sección en perspectiva del templo de Khonsu (Egipto). Reproducida de *Templo de Khonsu* (p. 187), por L.M. Roth, 1999, Copyright.

Figura 4
Templo del Valle, pirámide de Kefrén, Gizeh



terísticas transmitiendo las cargas al suelo. Schopenhauer, en sus Lecciones sobre metafísica de lo bello (2004), expresa “la columna es la forma más simple que se encuentra lisa y llanamente determinada por el fin de sustentar” (p. 190).

Es así como la columna se vuelve un elemento fundamental en los templos egipcios, la cual llega a determinar la espacialidad de la arquitectura, Giedion (1975) menciona:

El tamaño de las intercolumnas quedaba estrictamente controlado por la longitud permisible de los elementos monolíticos que componían el arquitebe (...) En las hipóstilas del templo de Karnak, las columnas tienen un diámetro de 4m. La longitud de las vigas

Nota. Adaptado de *Templo del Valle, pirámide de Kefrén, Gizeh (Egipto)* (p. 23), por L.M. Roth, 1999, Copyright.

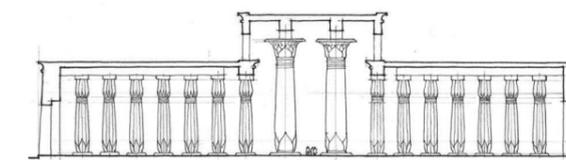
Figura 6
Columnas de la sala hipóstila, templo de Karnak



de piedra que las unen es, naturalmente, limitado. Por eso las columnas dan la impresión de que casi absorben el espacio”. (p.114)

Además, la columna también llega a tomar un papel de significado respecto a las creencias espirituales egipcias mediante formas esculpidas en ellas y tallados sobre temas iconográficos, otorgándole así una función expresiva.

Figura 5
Sección por la sala hipóstila del templo de Karnak



Nota. Reproducido de *Sección sala hipóstila Templo de Karnak* (p. 59), por Ching, Francis D. K., 2011, Copyright.

Nota. Adaptado de *Templo de Karnak*, por National Geographic, 2018, (https://historia.nationalgeographic.com.es/a/shes-honq-i-faraon-que-conquistó-jerusalén_8678). Copyright.

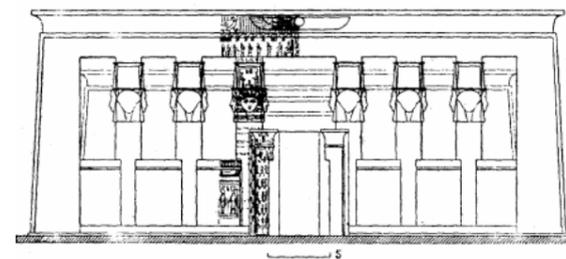
Figura 7
Templo Dendera



Con esto las columnas semejan más ser una escultura que un elemento estructural, donde esta función expresiva toma verdadero valor y se desliga de la portante.

En la arquitectura egipcia todos los elementos estructurales son arquitectura, sin muros, columnas y dinteles, prácticamente no hubiese obra arquitectónica que apreciar; la estructura

Figura 8
Simbolismo en la estructura, Templo Dendera



Nota. Reproducido de *Templo Dendera* (p. 62), por A. Choisy, 1899, Copyright.

Nota. Adaptado de *Templo de Hathor, Dendera*, 2008, (https://es.wikipedia.org/wiki/Templo_de_Dendera#/media/Archivo:Dendera_7_977.PNG). CC0

ejerce un papel polivalente (racional-expresivo); no solamente cumple una función de soporte, sino que también configura el espacio y toma un valor significativo derivado de la realidad cultural de la época.

Para los egipcios la estructura no tenía importancia en sí misma como elemento racional, sino que se le otorgo a esta un lenguaje expresivo buscando una connotación espiritual, donde la estructura se convierte en el medio y la arquitectura en el fin, entendiéndose como medio, el servicio de la estructura para materializar una idea.

Resumiendo, en Egipto esta idea era construir templos para honrar a los dioses, donde la monumentalidad era necesaria en su contexto cultural; de esta manera la configuración estructural de los templos junto con muchos otros factores da paso a la arquitectura.

Por todo esto, se debe interpretar la estructura desde un discurso más amplio que el estrictamente técnico para establecer suposiciones de su verdadero valor.

1.1.2. Arquitectura griega

Retomando el tema de la columna, pese a que en Egipto ya se utilizó este sistema arquivado en piedra; es en Grecia en donde se posiciona como símbolo inequívoco de toda una arquitectura, siendo los Templos griegos los más representativos.

En la arquitectura griega las columnas se vuelven más esbeltas y salvan mayor luz, generando una percepción diferente del espacio, ya que soportan menos carga con cubiertas de madera a dos aguas; a diferencia de los templos egipcios que soportaban pesadas vigas de piedra a lo largo de toda la planta.

Figura 9
Columna, acción y reacción

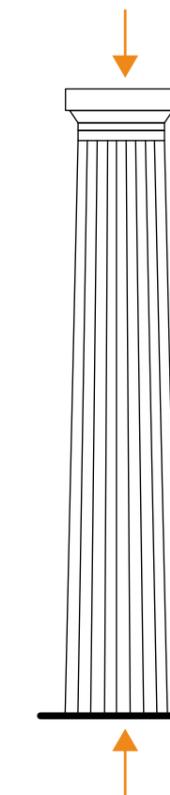
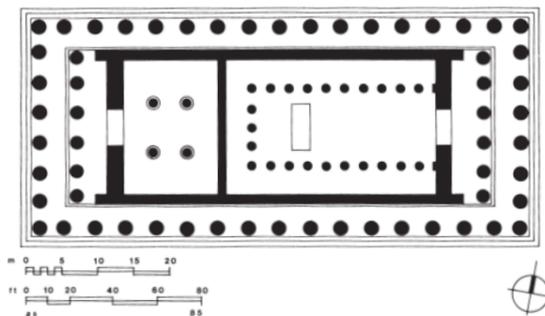
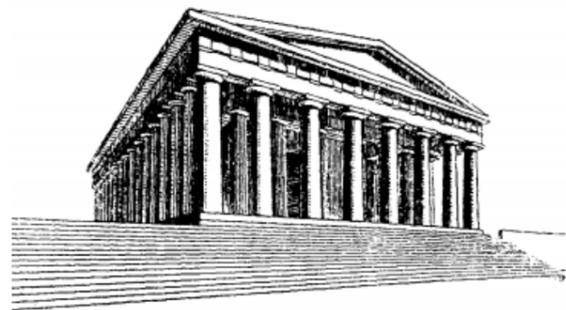


Figura 10
Planta del Partenón de Atenas



Nota. Reproducido de *Ictinos y Calícrates, Partenón, Atenas* (p. 216), por L.M. Roth, 1999, Copyright.

Figura 11
Perspectiva del Partenón de Atenas



Nota. Reproducido de *El Partenón y sus ángulos* (p. 416), por A. Choisy, 1899, Copyright.

La forma de la columna griega como menciona Torroja (2010) “circular tronco-cónica, ensanchando hacia abajo, es la lógica” (p. 81), puesto que está sujeta a compresión. “La compresión que afecta a la columna en el sentido vertical de la gravedad, que tiende a apretar la columna, establece la forma vertical de este elemento por oposición al esfuerzo al que se ve sometido” (Cervilla, 2015, p. 65).

Así la forma de la columna de algún modo queda justificada; pero que los arquitectos griegos consoliden a los peristilos como primera imagen de su arquitectura no es exclusivo de esta lógica estructural, como afirma Giedion (2009) esta relación entre carga y soporte era solo el punto de partida de un proceso destinado a integrar todo el templo en una sintonía de racionalidad absoluta.

Los arquitectos griegos eran muy conscientes

de la relación que guarda el sostener y soportar en toda estructura, para poder preceptuar como la gravedad junto con esta relación se solidifican en la configuración visual de la arquitectura proyectada en sus templos y donde el objetivo de esta arquitectura para Giedion (2009) es explicar la relación directa entre carga y soporte.

La composición de los Templos griegos es sencilla: desde el suelo se encuentra el podio, que no es estrictamente horizontal, sino que está ligeramente curvado para jugar con la percepción del ojo humano, así las columnas que se apoyan sobre este son más bajas en las esquinas y más altas en el centro; el elemento de transición entre el podio y el fuste estriado de la columna, es la basa y entre el fuste y el arquitrabe, es el capitel y sobre este último el arquitrabe.

Los arquitectos griegos según Los Diez Libros de Arquitectura de Vitruvio, dejan en primer plano la estructura; fijando un vocabulario de formas atribuidas a las columnas y en donde cada uno de los elementos de los Templos debían guardar una estricta correlación en su composición total.

Los distintos templos de Grecia conservan el mismo sistema estructural arquitrabado, sin embargo, los arquitectos llegaron a desarrollar distintas variaciones formales en cada uno de ellos, siendo el peristilo el configurador de estos dando paso a distintas clasificaciones como: el templo in antis, el templo próstilo, el templo anfi próstilo, el templo períptero, el templo seudodíptero, el templo díptero y el templo hípetro. Otra de las clasificaciones de los templos se establece de acuerdo al número de columnas en su frente como los templos: tetrástilo, hexástilo, octástilo o decástilo.

Figura 12
Clasificación del Templo Griego según la configuración del peristilo

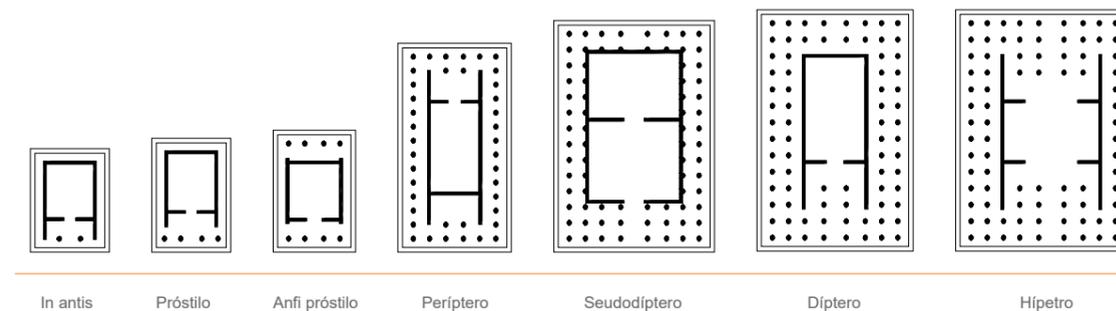
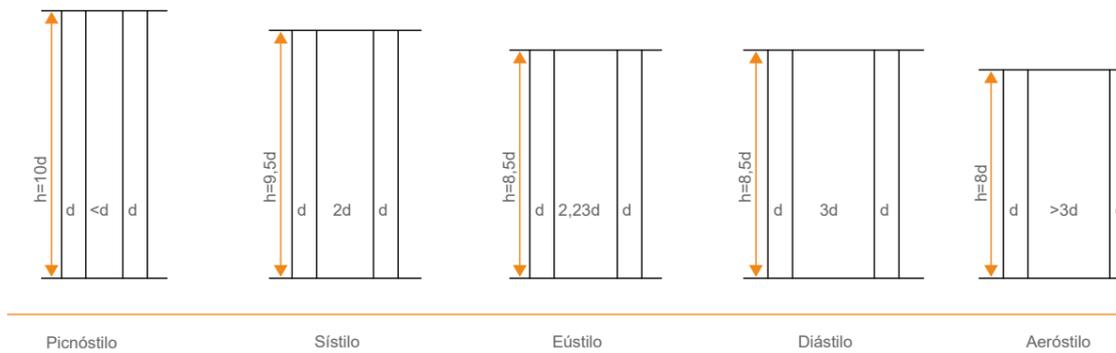


Figura 13
Clasificación del Templo Griego según la proporción del intercolumnio



También existen clasificaciones según la proporción del intercolumnio como: el templo picnóstico, el templo sístilo, el templo eústilo, el templo diástilo y el templo aeróstilo.

Quizás la más universal de estas clasificaciones es la de los órdenes dórico, jónico y corintio. Cada uno de estos guardan diferencia en sus columnas, arquitrabe, vigas

Figura 14
Clasificación del Templo Griego según el orden



y dinteles. Resumiendo, el orden dórico es el más básico por así decirlo de todos los órdenes y es mucho más robusto a diferencia del orden jónico y corintio de proporciones más delgadas y esbeltas.

Con esta breve referencia a la clasificación de los peristilos ya se denota que la arquitectura griega prácticamente gira entorno a la columna, constituyéndola como elemento principal de la misma. La columna se establece con total coherencia mediante sus distintas configuraciones, donde además se le otorgó un lenguaje expresivo y escultórico con todo un repertorio de formas, asumiendo un papel de significado y signifiante.

Hay que tener claro que no es lo mismo la estructura física en su sentido más literal como el “esqueleto del edificio”, que la estructura

perceptible. Muchas de las columnas griegas están sobre dimensionadas como en el caso del Partenón, donde la capacidad de sus columnas de mármol para resistir los esfuerzos a los cuales se encuentran sometidas es muy superior; o en dicotomía, puede suceder que la columna se desprenda de su función estructural como ocurre en el interior del Templo y sean únicamente decorativas; o en combinación de las anteriores cumplir tanto con la función de sustento como la función de ornamento, según lo expresa Vitruvio en Los diez libros de Arquitectura.

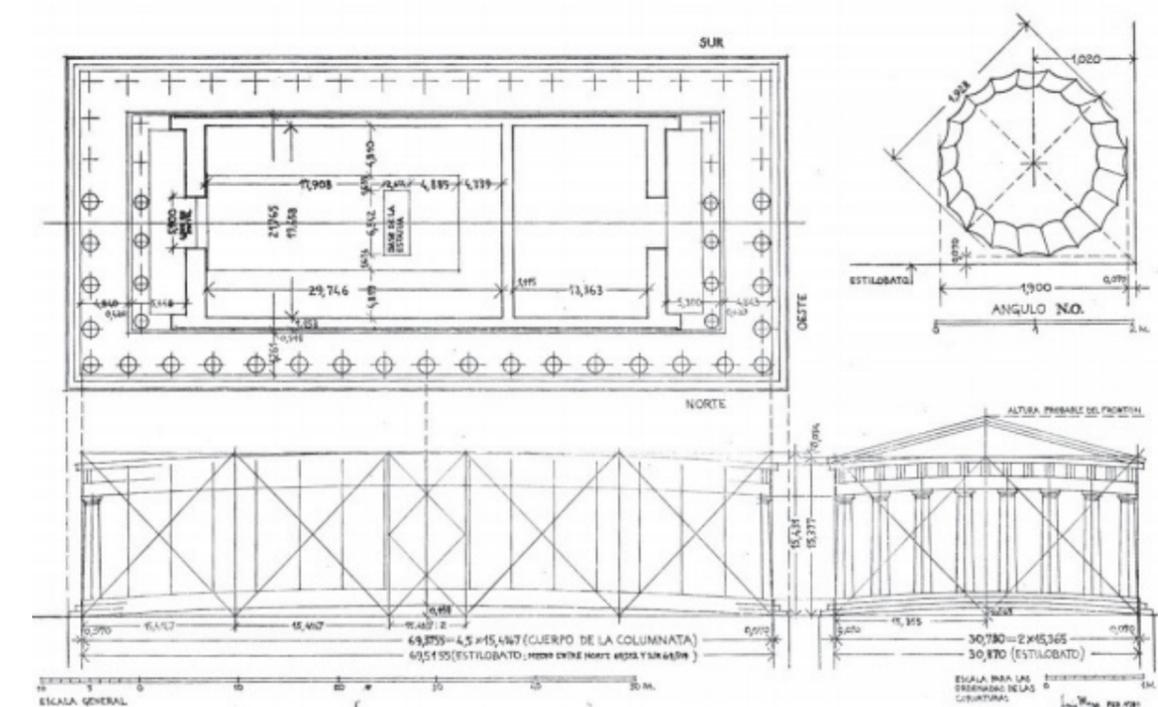
En el Partenón la simetría apreciada por el ojo humano se da gracias a las correcciones ópticas de la edificación, que guardan mayor relación con la percepción armónica de un todo que con la función estructural, como menciona Torroja, (2007) “los griegos, maestros en

este género de sensibilidades ópticas, corregían y ponderaban sus intercolumnios, bajo los frontones de sus templos, para mejorar la impresión estética de su ritmo de columnas” (p. 260).

Por otra parte, el mármol blanco de Grecia no fue concebida como un material que se exprese por sí solo, antiguamente el Templo se pintaba de colores alegres, sobre todo en el frontón, además las estrías en las columnas buscan la desmaterialización de la piedra para suavizar la solidez de su apariencia.

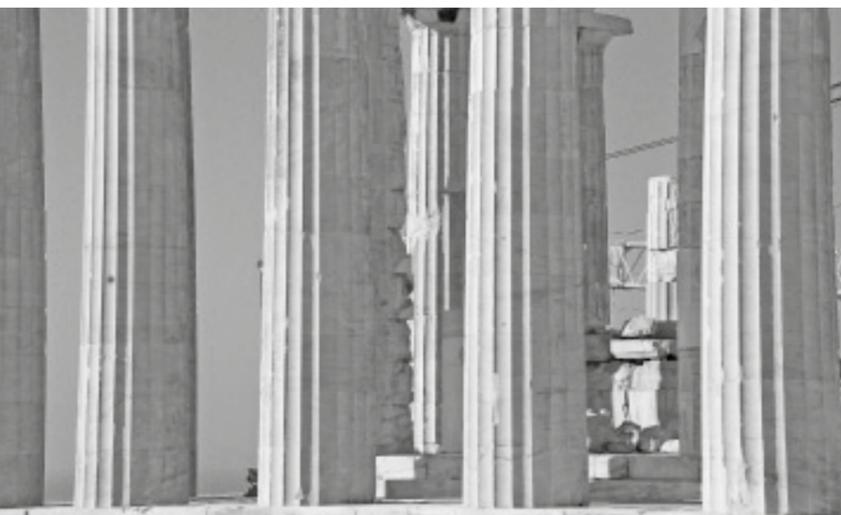
La columna se vuelve el morfema de la arquitectura, la cual expone a la estructura como portada, afirmando el control sobre la ley de gravedad, donde la idea de sustentar se convierte en arquitectura por medio de la estructura.

Figura 15
Proporciones del Partenón



Nota. Reproducido de *Las medidas del Partenón según Nicolás Blanos*, (p. 476), por L. Moya, 1981, Copyright.

Figura 16
El Partenón de Atenas



Dicho esto, resulta interesante como una arquitectura puede otorgar a su estructura versatilidad de su función inherente, anexando aspectos técnicos, plásticos y ornamentales al mismo tiempo, para conformar un lenguaje expresivo.

Figura 17
Elevación frontal del Partenón de Atenas



Nota. Reproducido de *Partenón de Atenas* (p. 128), por Ching, Francis D. K., 2011, Copyright.

Nota. Adaptado de *Efecto de desmaterialización de la luz sobre las columnas del Partenón* (p. 78), por A. Cervilla, 2015, Copyright.

Al final la racionalidad de la estructura no resulta tan absoluta como lo afirma Giedion, esta racionalidad más bien queda únicamente expresada en una idea, donde nuevamente al igual que en la arquitectura egipcia la estructura está a disposición de la expresión de esta idea.

1.1.3. Arquitectura romana

A diferencia de los egipcios y los griegos que construyeron edificios dedicados al espíritu y los dioses en donde el espacio interno era muy poco accesible; los romanos buscaron una nueva configuración del espacio público destinado a contener a grupos de personas, lo que es clave en la arquitectura romana. Esta configuración tiene relación directa con el arco, kostof (1985) menciona que “los romanos estaban obsesionados con la curva: en planta y en alzado y en la concepción es-

pacial de las habitaciones. La característica del arco es que dominaba el espacio” (p. 33).

Los arquitectos romanos manejaban el arco de medio punto, anteriormente usado en Mesopotamia; el cual permite cubrir una luz mayor en las aberturas de los muros, que los dinteles.

Las fuerzas gravitatorias engendradas por el muro que descansa sobre el arco se distribuyen a lo largo de este transformadas en fuerzas diagonales que son, aproximadamente, perpendiculares a la cara inferior de cada una de las dovelas. Así pues, cada una de las dovelas está sometida a fuerzas de compresión (...) la piedra clave, cierre el arco. En ese mismo momento, el arco se convierte en autoportante. (M. Roth, 1999, pp 63-64)

Figura 18
Relación de distribución de cargas entre un dintel y un arco

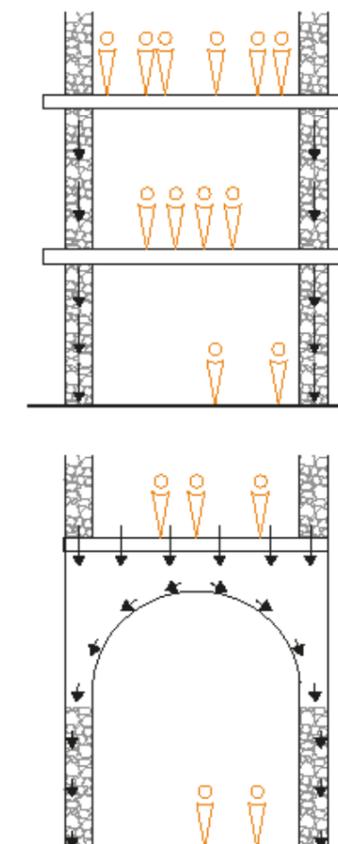
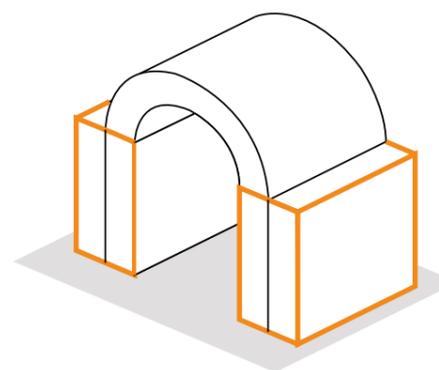
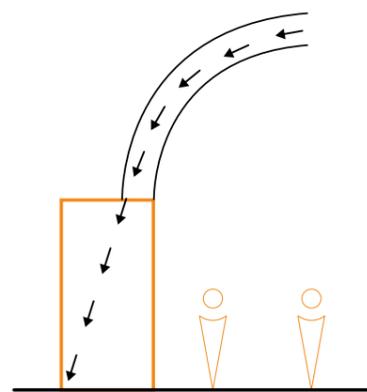
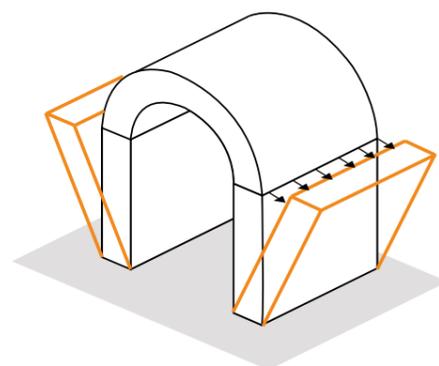
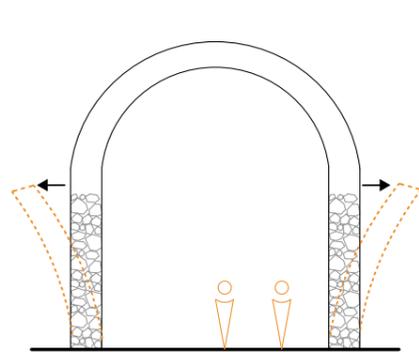


Figura 19
Empuje lateral que ejerce una bóveda de cañón



Bajo este principio del arco se da paso a la bóveda de cañón como una proyección a lo largo de un eje, y a la cúpula como un giro completo de 360 grados sobre un plano horizontal.

Para contrarrestar el peso de las cúpulas y las bóvedas, los cuales ejercen un empuje lateral que tiende a abrir el muro en su parte superior; los arquitectos romanos recurrían a muros excesivamente robustos para lograr verticalizar las fuerzas oblicuas de las bóvedas y cúpulas.

Los arquitectos romanos además siguieron utilizando los órdenes griegos y sus elementos estructurales, principalmente las columnas, pero esta vez no con función estructural, sino más bien decorativa, prefiriendo usar la columna como ornamento que como sustento.

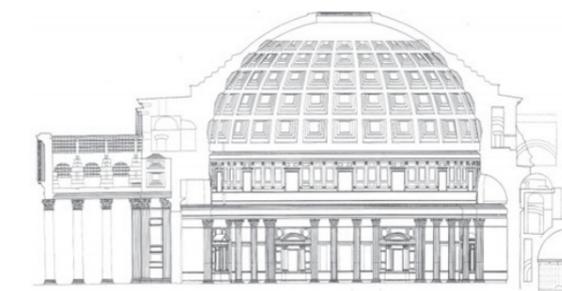
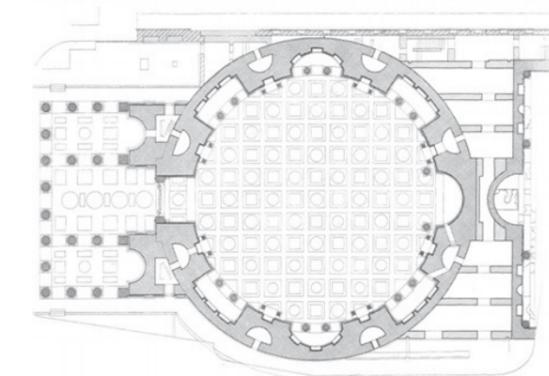
El arquitecto racionalista Viollet le Duc (2007)

hace una analogía de la arquitectura romana con un hombre vestido, por un lado, está el hombre, por otro lado, está el vestido. En la arquitectura romana está la estructura, la construcción auténtica, real y útil, combinada con vistas a cumplir un programa fijado con gran maestría; y está el envoltorio, la ornamentación, que es independiente de la estructura en la misma medida en que el vestido es independiente del cuerpo humano.

Tomando únicamente como ejemplo el Panteón, una de las obras más importantes de la arquitectura romana, ya se puede comprobar la analogía de Viollet.

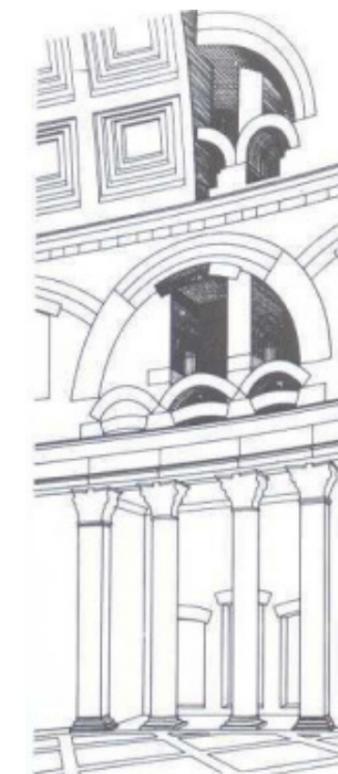
El Panteón tiene tres partes diferenciadas: un profundo pórtico octástilo en el acceso; una zona intermedia de transición; y una inmensa nave cilíndrica cubierta por una cúpula.

Figura 20
Planta y sección del Panteón de Roma



Nota. Reproducido de *Panteón de Roma* (p. 120), por W. Jones, 2000, Copyright.

Figura 21
Arcos ocultos en la masa de la estructura



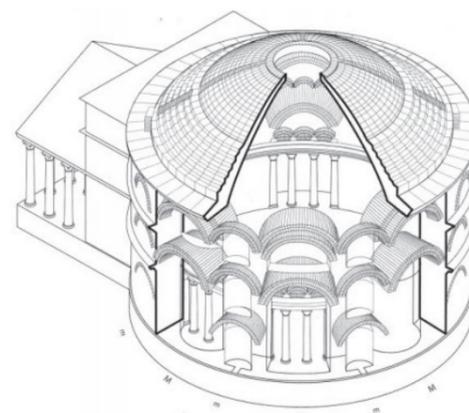
Nota. Reproducido de *Roma, Panteón, detalle estructural* (p. 53), por Norberg, 1999, Copyright.

Figura 22
Arcos de descarga del muro cilíndrico en fachada



El muro perimetral del Panteón está compuesto por ocho grandes nichos, alternados por otros ocho grandes machones. El muro es de 6m de espesor el cual soporta aproximadamente 10.000 toneladas del peso de la cúpula; sin embargo, el arquitecto romano no

Figura 23
Estructura interna del Panteón



Nota. Reproducido de *Concrete Vaulted Construction in Imperial Rome. Innovations in context* (p. 62), por L. Lancaster, 2005, Copyright.

Nota. Adaptado de *Arcos de descarga* (p. 99), por A. Cervilla, 2015, Copyright.

expone las dimensiones del muro ni su estructura interna, sino que opta por dejar a la vista columnas corintias que envuelven internamente todo el perímetro de la planta cilíndrica, las mismas que no tienen ninguna función estructural y que no están soportando ninguna carga, únicamente son decorativas, proyectadas para enriquecer el espacio plano del cilindro.

En el segundo nivel se encuentran ventanas con frontón, siguiendo el eje de nichos y machones, y en el intereje se disponen cuadros ciegos. Y por último sobre el segundo nivel se apoya la cúpula, constituida por filas de casetones que van disminuyen en tamaño y profundidad hacia el óculo de esta.

Gran parte de la estructura del Panteón se esconde tras la ornamentación. La gran cúpula produce una carga continua y horizontal, la

cual se distribuye a través de un sistema de arcos y bóvedas de descarga que se encuentran dentro del muro, lo que también permite abrir en este los nichos y machones sin debilitar la estructura.

Como resultado se obtiene una cúpula que se percibe más liviana de lo que ciertamente es; sobre un muro que parece más liviano de lo que ciertamente es; con columnas corintias que pueden parecer que verdaderamente ejercen sostén cuando ciertamente no es así.

En este como en muchos otros ejemplos las estructuras romanas de arcos y bóvedas lo que requieren es de anchos muros que funcionen como contrafuertes, y no de columnas que no resisten los empujes de los arcos y bóvedas. Por esto lo romanos muchas veces solo usaron las columnas exclusivamente con funciones decorativas.

Los romanos bajo sus propias reglas desarrollaron todo un lenguaje estético. John Summerson (1984) menciona:

En muchos edificios romanos, los órdenes son absolutamente inútiles desde un punto de vista estructural, pero hacen expresivos a los edificios, les hacen hablar. El conjunto – estructura y expresión arquitectónica – debe constituir un todo integrado y esto implica introducir las columnas de muy diversas maneras. (p. 26)

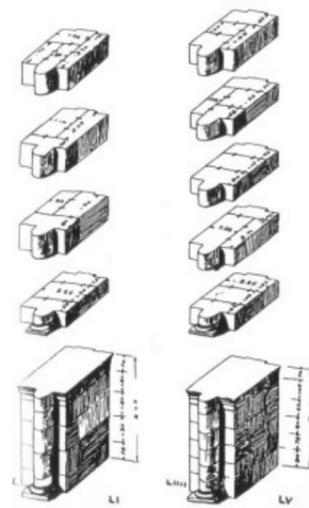
Al contrario de los templos griegos donde la estructura se dejaba a la vista, la arquitectura romana oculta la verdadera estructura como en el Panteón de Roma y otras edificaciones como el Coliseo Romano, el cual se reviste de columnas para ornamentar el ancho muro es-

Figura 24
Fachada del Coliseo Romano



tructural, donde los órdenes griegos serían el vestido y el muro el cuerpo según la analogía de Viollet.

Figura 25
Estructura del Coliseo Romano



Nota. Reproducido de *Aparejo de la fachada del Coliseo* (p. 121), por R. Taylor, 2006, Copyright.

Nota. Adaptado de *Detalle de los tres pisos superiores de la fachada* (p. 107), por A. Cervilla, 2015, Copyright.

La estructura se oculta con estructura, aunque esta idea parezca inverosímil. En la arquitectura romana la estructura deja de ser estructura y se vuelve ornamento; esta versatilidad de funciones conduce a la reflexión de como un elemento estructural puede desprenderse de su génesis funcional y ser considerado como un elemento que otorga belleza a la construcción (ornamento), de nuevo aquí el contexto cultural muestra el valor que se le otorga a la estructura; en la actualidad me atrevería a decir que ningún arquitecto, o casi ningún arquitecto propondría en su diseño hacer uso de columnas sin que estas cumplan con alguna función estructural, sino por simple hecho de considerar que las columnas puedan llegar a dar mayor valor estético a su proyecto.

1.2. Edad Media

1.2.1. Arquitectura bizantina

A pesar de que Bizancio se consideró como la nueva capital del imperio romano, la arquitectura bizantina estuvo lejos de asemejarse a la romana. Los bizantinos influenciados también por oriente, imprimieron en sus edificaciones un aspecto visual, espacial y estructural propio en la fisionomía de la arquitectura, otorgando a sus construcciones de un reconocible carácter.

Aquí la columna retoma su origen estructural suprimido antes en la arquitectura romana por un propósito único decorativo y por la aprensión de que soportes tan esbeltos no resistan las macizas bóvedas de hormigón y piedra. Las cisternas de Constantinopla son ejemplo del funcionamiento estructural de bóvedas sobre columnas que nos deja la arquitectura bizantina.

La forma de los elementos de la columna tallada en piedra como la base, el fuste y el capitel responden a su funcionamiento estructural, sin perder las decoraciones sutilmente talladas en sus capiteles correspondientes a los distintos ordenes; donde además se incorporaron anillos metálicos en este y en la base de la columna para reforzarla, debido a las grandes bóvedas que tenía que soportar.

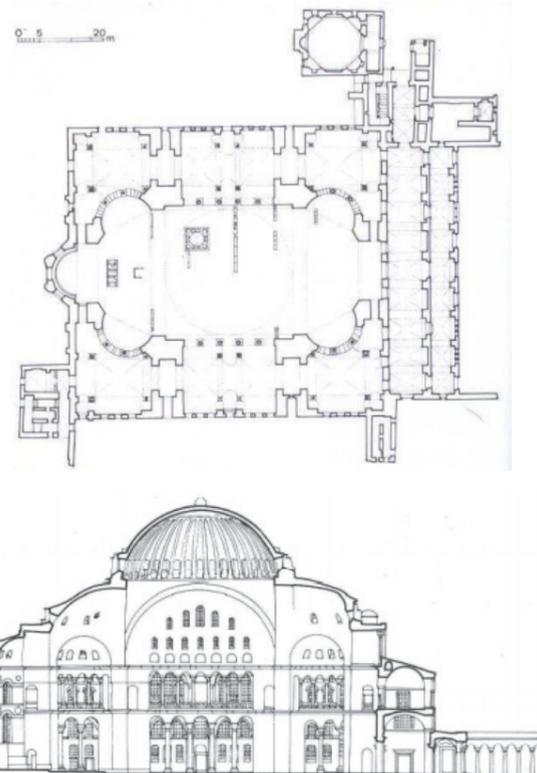
Por otro lado, mientras que en Roma las bóvedas necesitaban cimbras como moldes por la plasticidad del hormigón; según Choisy (1997) “los arquitectos bizantinos se plantean sin embargo el problema de abovedar sin cimbras y, gracias a ingeniosas disposiciones de los materiales, llegan a resolverlo, elevando la mayor parte de sus bóvedas en el espacio” (p. 5).

Las construcciones bizantinas se realizan con cimbras en bóvedas de cantería y sillarejo y

sin cimbra únicamente en ladrillo que fue el material predilecto para las construcciones. Sin embargo, el principal aporte de la arquitectura bizantina fue la cúpula sobre una planta cuadrada, ejemplificada en la obra más simbólica de Constantinopla la Basílica Santa Sofía, donde Antemio de Trales e Isidoro de Mileto por encargo de Justiniano, construyeron el edificio más grande e imponente hasta el momento.

A diferencia del Panteón en Roma en donde la gran cúpula se asienta sobre un cilindro, el cual soporta los empujes en todo el perímetro por su estructura de arcos internos; en Santa Sofía se busca asentar la cúpula sobre una planta cuadra manteniendo debajo un gran espacio abierto. Esto solo fue posible mediante el uso de grandes arcos para conservar un espacio aéreo y diáfano bajo la imponente cúpula, que refleje el poder del imperio y eleve

Figura 26
Planta y sección, Santa Sofía



Nota. Reproducido de *Santa Sofía, sección y planta* (p. 70), por Norberg, 1999, Copyright.

el concepto simbólico del espíritu cristiano en la basílica.

Al espacio que queda entre los enormes arcos y la gran cúpula a manera de triángulos esféricos se los denominó pechinas, las cuales facilitan la transición de la planta cuadrada a la planta circular de la cúpula.

La gran cúpula de Santa Sofía también se une a otras dos semicúpulas más pequeñas en sentido longitudinal y cuatro grandes contrafuertes en sentido transversal para reforzar los arcos y así contrarrestar el empuje lateral que genera, configurando así una planta rectangular característico de las iglesias paleocristianas.

Si bien la forma final materializada como arquitectura es la expresión física inequívocamente de soluciones estructurales; la concep-

ción formal del proyecto ajusta la percepción espacial y visual a su conveniencia.

La cúpula de 32,6m de diámetro, elevada a 40m de altura y rodeada en su tambor por 40 ventanas, deja entrar la luz para dar la ilusión de que esta casi flotando, como menciona Procopio “meteôrizesthai”, como si el aire la sostuviese. Para realzar esta ilusión de negación a la gravedad se recubre internamente a la cúpula con mosaicos dorados para reflejar la luz y aumentar la sensación de ligereza en ella.

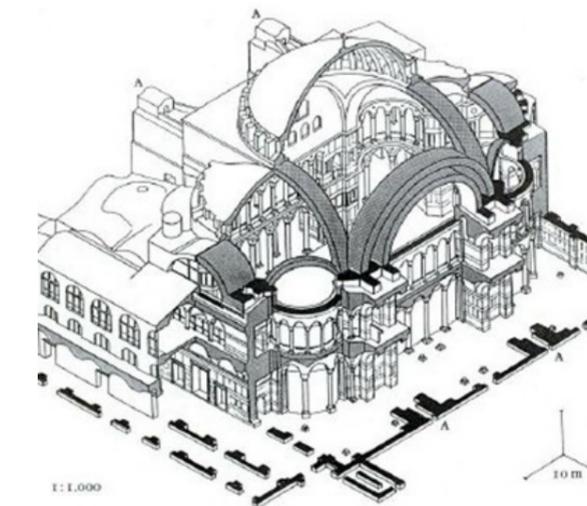
Otros elementos estructurales como los machones se igualan con los grandes arcos logrando perderse en la continuidad de la superficie lisa del muro, donde estos se extienden para dar paso a enormes contrafuertes que en el exterior tampoco se los percibe, quedando embebidos en la fachada de los muros late-

Figura 28
Interior de la Basílica de Santa Sofía



rales de las naves que no son de soporte, lo que permite que se abran vanos para generar mayor iluminación hacia el interior sin comprometer en ningún momento la estructura.

Figura 27
Estructura de Santa Sofía

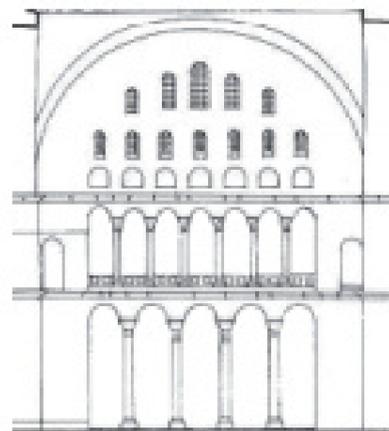


Nota. Reproducido de *Hagia Sophia, vista isométrica* (p. 98), por Mainstone, 2006, copyright.

Nota. Adaptado de *Santa Sofía*, por National Geographic, 2020, (https://viajes.nationalgeographic.com.es/a/museo-a-mezquita-sera-posible-visitar-santa-sofia_15737). Copyright.

Las 4 columnas de la planta baja que conforman el interior de las naves laterales soportan el matroneo donde se disponen 6 columnas de menor tamaño que a su vez soportan los muros-pantalla; la singularidad de esta distribución es que no se mantiene el mismo eje vertical entre las dos plantas de columnas.

Figura 29
Nave lateral de Santa Sofía



Nota. Adaptado de Alzado de la nave lateral de Santa Sofía (p. 146), por A. Cervilla, 2015, Copyright.

Esta disposición dispareja entre los órdenes de las columnas en planta baja y planta alta difícilmente hubiese sido admitida por los arquitectos de la antigua Grecia.

La idea de sustentación tampoco es la protagonista en la arquitectura Bizantina y claramente se refleja en Santa Sofía, donde se trata de dar un sentido ilusorio a la estructura, movida por el fuerte concepto proyectual que desde un inicio se buscó en el valor de un espacio diáfano, continuo y místico.

En la arquitectura bizantina todos los elementos están en función de un fin que va más allá de lo puramente técnico, teniendo en cuenta que las grandes construcciones como la Basílica de Santa Sofía se edificaron bajo la precisión de formas geométricas; un fin que tiene que ver más con la percepción del espacio.

Como menciona Procopio respecto a la cúpula:

Parece no reposar sobre una estructura sólida, sino cubrir el espacio suspendida del cielo. Todas las partes encajan con increíble habilidad en el aire apoyándose mutuamente. Dotándose la fábrica toda de una unidad armónica extraordinaria, de manera que no permite al exportador detener la mirada en un punto, sino que cada detalle seduce al ojo y lo atrae irresistiblemente hacia él.

Y es que el espacio interior bien logrado en la arquitectura bizantina a través de esa sensibilidad visual gracias a elementos como la luz y todos los detalles materiales, otorga un sentido espacial divino encaminado al tema religioso, en donde un bizantino sencillo del siglo IX

no le cabría en la cabeza que Santa Sofía no se hubiese construido de alguna manera más que por obra milagrosa, así lo demuestran los testimonios de Constantino quien también afirma:

Cada vez que se entra en la iglesia para rezar se comprende inmediatamente que no es una obra salda de la maestría técnica o de la habilidad humana, sino que su origen es divino; el espíritu se transportado en el aire hacia Dios, presumiendo de que Él no se aleja, sino que El ama habitar este lugar que El mismo eligió. Y esto no solo sucede cuando uno va a la iglesia por vez primera, sino cuando la ve en sucesivas ocasiones.

La estructura no se expone de forma cruda, sino que se dispone de manera tal, que logra

reflejar la idea de misticidad interior, donde la estructura no se esconde, pero se convierte en ilusoria ya que aparenta algo que no es.

1.2.2. Arquitectura Románica

La arquitectura románica se desarrolló en Europa a partir del siglo XI y a pesar que se continuaron usando los mismos elementos estructurales que en Roma (509 A.C -IV D.C); se encuentra muy alejado el hecho de que éstas dos arquitecturas se parezcan. En el románico estos elementos se emplearon de diversas maneras, estableciendo diferentes configuraciones (formales, estructurales o tipológicas) en toda la extensión geográfica que abarco este periodo.

Con el uso principalmente de la piedra en las construcciones románicas, junto con los sistemas estructurales como: arcos de medio

punto, bóvedas de cañón, bóvedas de crucería y cúpulas, se desarrolla una arquitectura maciza con potentes y toscos elementos sustentantes como: muros, pilares y contrafuertes para poder soportar todos los empujes laterales de estos pesados elementos.

Figura 30
Distribución de cargas en arcos fajones

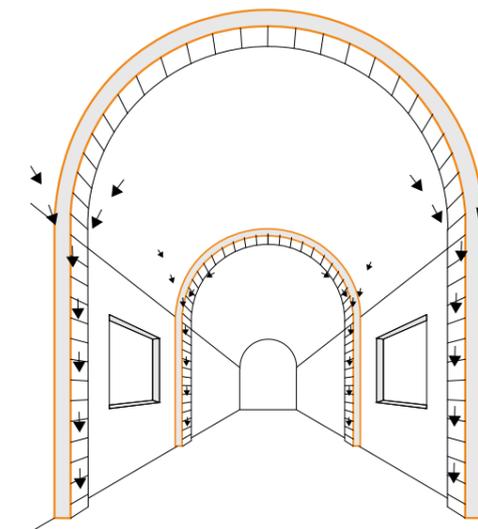
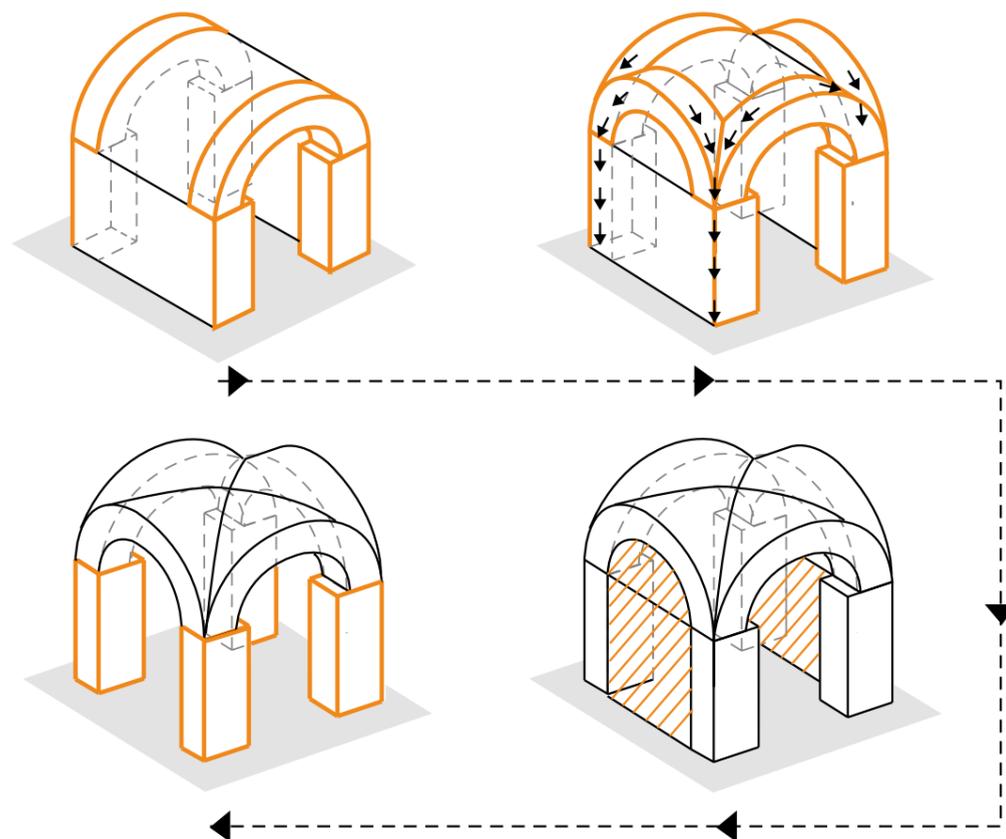


Figura 31
Evolución hacia la bóveda de aristas



También se usaron los arcos fajones o perpiaños que funcionan a manera de nervios a lo largo de las bóvedas, como afirma Torroja (2010): “Las ventajas de este tipo de aparejo se acusan especialmente al emplear arcos perpiaños como refuerzo de la bóveda” (p.106), esto con el fin de que los muros no sean los únicos que soporten todo el peso de las bóvedas y así poder abrir vanos más grandes sin llegar comprometer la estructura portante de los muros.

Gracias a esto además se logró que el peso de la bóveda solamente quede apoyado en 4 puntos, eliminando de esta forma los muros y dejando únicamente 4 pilas; originándose la bóveda de aristas, que equivale a dos bóvedas de cañón entrecruzada perpendicularmente y de esta manera también ganaron luz hacia el interior de los espacios.

La arquitectura románica toma mayor fuerza con las iglesias de peregrinación, denominadas así por el movimiento de peregrinación de carácter religioso que se da en Europa en este tiempo; las cuales a diferencia de las iglesias rurales debían albergar a gran cantidad de personas que hacían este recorrido; por lo que se necesitó de espacios mucho más grandes, y para conseguir espacios mucho más grandes se tiene que pensar en estructura, sistemas constructivos y materiales.

La Basílica Saint Sernin de Toulouse como otras de peregrinación, mantienen un lenguaje común en su planta de forma de cruz latina de 3 o 5 naves, siendo la central más ancha y alta que las laterales, la misma que termina en un ábside semicircular; en medio del cruce transversal entre la nave central y el transepto se eleva un cimborrio o una cúpula.

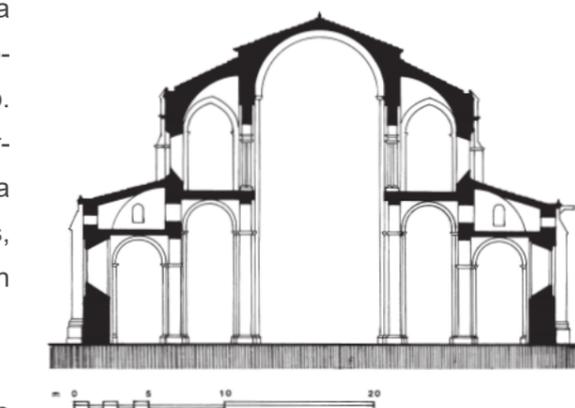
El eje longitudinal de la iglesia lo conforma la bóveda de cañón que se eleva en toda la nave central mediante arcos fajones, los cuales además de cumplir su cometido estructural aportan de cierta manera a la estética de la edificación, Torroja menciona:

Estos arcos no son solamente elementos ornamentales, que cortando la monótona continuidad del cañón mejoran su aspecto, recintando el espacio. Son verdaderos elementos de refuerzo, cuyo efecto de extiende a toda la bóveda, a lo largo de las generatrices, gracias a la rigidez de la misma en esta dirección. (p. 106)

La forma de las columnas responde a este sistema estructural, donde los arcos fajones de las bóvedas de cañón y los arcos formeros

que configuran las naves, descansan sobre pilastras o columnas que se adosan al pilar cruciforme, dando lugar a pilares compuestos.

Figura 32
Sección transversal de Saint Sernin de Toulouse



Nota. Reproducido de *Saint-Sernin, Toulouse. Sección transversal* (p. 303), por L.M. Roth, 1999, Copyright.

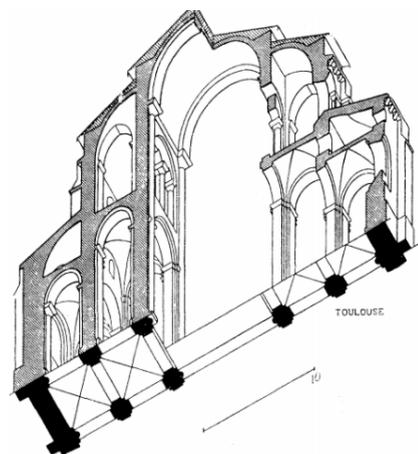
Figura 33
Saint Sernin de Toulouse



Esta composición de los pilares, no solo resuelve el sistema estructural de arcos, sino que también con la suma de estos elementos, los macizos pilares se convierten en elementos plásticos de gran atractivo, ejerciendo un

juego visual que difícilmente permite ver de forma explícita el espesor de los pilares, pero lo que sí permite es entender el sistema estructural de los mismos, casi como si dibujasen el camino de las cargas hacia el suelo.

Figura 34
Sección axonométrica de Saint-Sernin de Toulouse



Nota. Reproducido de *Saint-Sernin de Toulouse* (p. 212), por A. Choisy, 1899, Copyright.

Nota. Adaptado de *Saint-Sernin, Toulouse* (p. 304), por L.M. Roth, 1999, Copyright.

También existen otros elementos como los arcos ciegos, que son arcos dispuestos a lo largo del muro con el único propósito de decorar las grandes masas, pero que no tienen mayor función estructural.

En cuanto a la fachada de Saint Sernin de Toulouse, la gran entrada está conformada por arquivoltas, que consiste en la repetición concéntrica de arcos de medio punto sobre pilares ornamentales para jerarquizar la entrada a la iglesia, las cuales también se las uso en ventanas para contrarrestar la simplicidad a los pequeños vanos en forma de arco y dar

profundidad a la fachada recta, permitiendo así también tener una noción de profundidad respecto al gran espesor de los muros.

Por fuera la iglesia se aprecia como una sólida y pesada estructura donde se dejan ver los contrafuertes que salen de los muros, subordinando la simetría de las ventanas.

En las construcciones románicas la estructura no se oculta, por el contrario se deja ver tanto en fachada como en el interior de las iglesias, donde la forma que adquiere la arquitectura es consecuente con el funcionamiento estructural, y donde cualquiera puede llegar a comprender a simple vista como trabaja la estructura y hacia donde se dirigen las cargas; pero no solo se aprecia la estructura en el sentido técnico sino también en el valor plástico que logra tener por la configuración de sus

elementos, aunque aquí también algunos de ellos se usan sin función estructural, contruidos solo como ornamento.

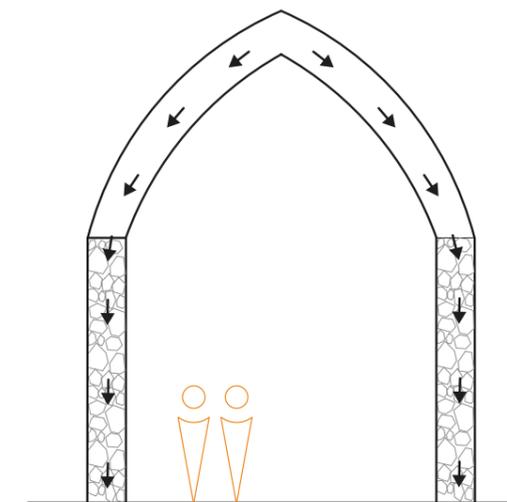
1.2.3. Arquitectura gótica

La arquitectura gótica pierde el lenguaje clásico y se presenta como continuación, evolución y ruptura de la pesadez de la arquitectura románica, donde la luz y la verticalidad se convierten en premisas de las construcciones góticas. Bajo estas premisas se configura un nuevo espacio diáfano en las iglesias, que se deriva directamente de la estructura, en donde el muro se expele de su función portante y se reemplazan por grandes ventanales con vidrieras.

Con esta nueva concepción del espacio, relacionado con la religiosidad y lo divino, surge

el deseo de conseguir mayores alturas y monumentalidad, lo cual fue resuelto por elementos estructurales antes usados en el románico pero que se convirtieron en elementos característicos y distintivos del gótico.

Figura 35
Distribución de las cargas en el arco apuntado



En el arco apuntado las cargas bajan mucho más verticales siendo menor el empuje horizontal que produce y por consiguiente la estructura que soporta estos arcos o bóvedas puede ser más delgada, alta y esbelta.

Con el arco apuntado se da paso a la bóveda de crucería que se “refuerza” como afirman varios teóricos con nervaduras diagonales, siendo la bóveda cuatrimpartita la más usada en el gótico; estos nervios a su vez se unen con las columnillas de los pilares.

Para contrarrestar los empujes laterales de las bóvedas se emplea el arbotante, este consiste en un arco exterior a la edificación el cual se ubican sobre las naves laterales para absorber estos empujes y transmitirlos a los contrafuertes hasta que se descarguen en el suelo.

Sobre los contrafuertes se ubican los pináculos a manera de peso muerto para verticalizar los empujes horizontales de los arbotantes y brindar estabilidad a los contrafuertes.

Figura 36
Bóveda de crucería

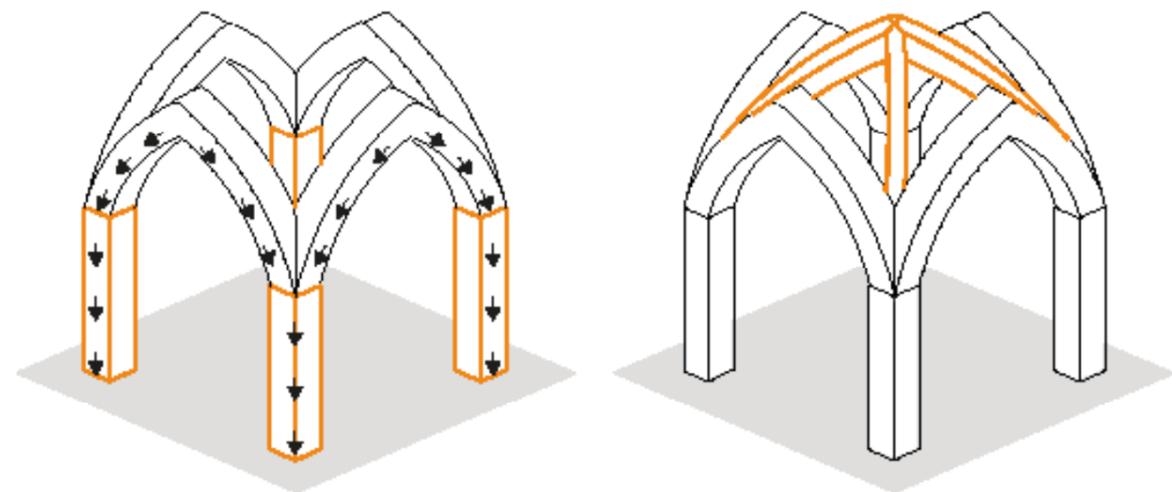


Figura 37
Trabajo de las estructuras góticas

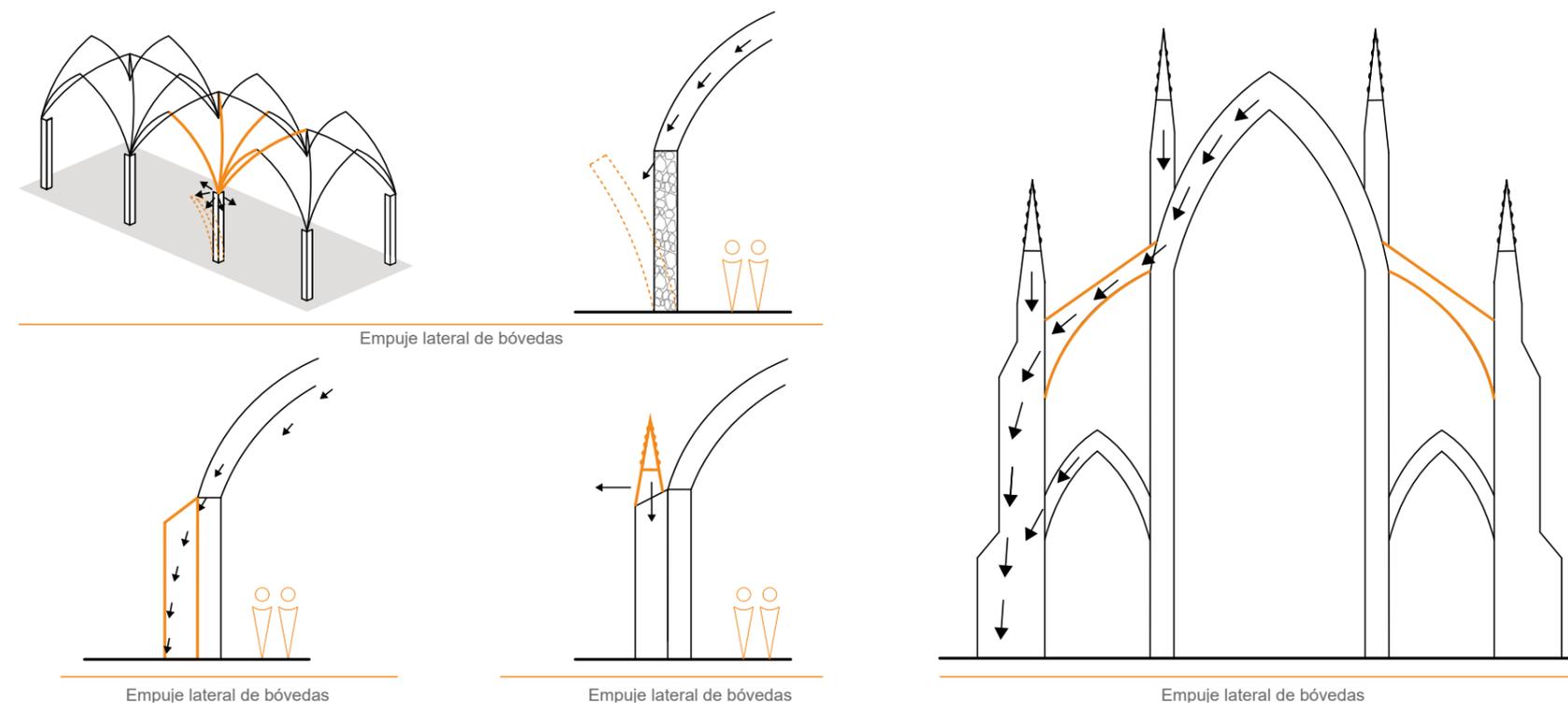
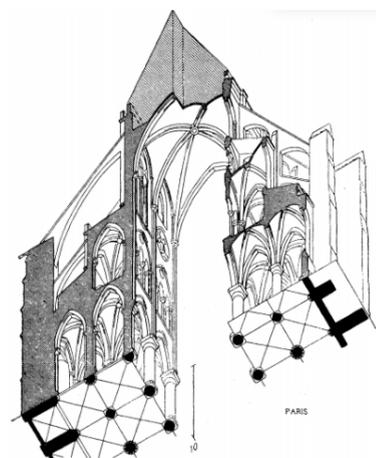


Figura 38
Interior de la Catedral Notre Dame, Paris



El interior y el exterior de las catedrales góticas son polos opuestos, tomando como ejemplo la Catedral de Notre Dame, el espacio interno se define según (Jantzen, 1970) en la ingravidez, la verticalidad, el apoyo invisible y la estructura diáfana.

Figura 39
Sección axonométrica de la Catedral Notre Dame



Nota. Reproducido de *Notre-Dame de Paris* (p. 428), por A. Choisy, 1899, Copyright.

Nota. Adaptado de *Santa Sofía, sección y planta* (p. 70), por Norberg, 1999, Copyright.

Logra un espacio interno místico, donde la verticalidad y la luz se conciben por medio de la estructura. En el interior de la catedral los pilares casi parecieran que se descomponen en sentido ascendente desde las columnillas o molduras que se ramifican en los nervios de las bóvedas hasta la clave como si fueran un solo elemento en completa continuidad.

Las columnas arrancan desde el suelo hasta la crucería sin una sola interrupción y en algunos casos siquiera sin detenerse para formar la curva de los nervios de las bóvedas. Esto da una sensación de altura imposible de obtener en otras arquitecturas muy interrumpidas por cornisas y dinteles. (Garciani, 2000, p. 258)

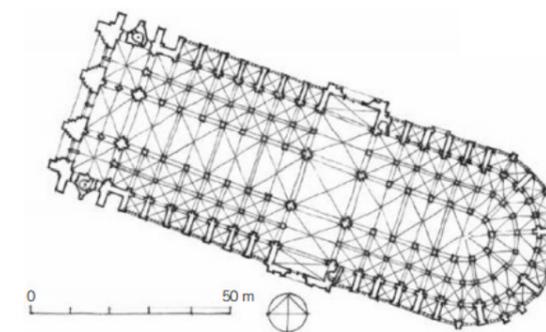
Como afirma Jantzen (1970) la impresión de la pared que se eleva como ingravida viene

Figura 41
Catedral Notre Dame, Paris



reforzada por el hecho de que, desde el interior nada puede ver de la razón técnica por la cual se mantiene en pie una construcción tan vertical; que es la razón de ser del soporte estructural gótico “gracias a cuatro ingenios: la bóveda de arista, el arbotante, el contrafuerte y el pináculo” (Addis, 2007).

Figura 40
Planta de la Catedral Notre Dame



Nota. Reproducido de *Notre-Dame de Paris, Francia: planta* (p. 398), por Ching, Francis D. K., 2011, Copyright.

Nota. Adaptado de *Notre-Dame de Paris*, Por Zuffe, 2009, (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Notre-Dame_de_Paris_2009-04-28.jpg#/media/File:Notre_Dame_dalla_Senna.jpg). CC BY-SA 3.0

“El exterior es el resultado del deseo de transmitir al ambiente circundante el espacio espiritualizado del interior. El significado de la iglesia ha dejado de ser cerrado en sí mismo y se ha convertido en parte integrante del entorno” (Schulz, 1980, p.191).

Se puede comparar la estructura del gótico con la estructura griega desde dos puntos, el primero radica en la expresión de la estructura como afirmación de gravedad y de sustento vista en los templos griegos y la contraposición de esta expresión en la estructura interna de la catedral gótica, donde la gravedad resulta inverosímil, pero que en ambos casos la expresión estructural se ayuda de efectos visuales. El segundo punto de comparación en cambio se encuentra en la similitud que guardan ambas al mostrar la estructura en sus fachadas, dejando a la vista todo el sostén de la edificación, convirtiendo a la estructura en

imagen de la misma.

Para llegar a comprender en totalidad la arquitectura gótica, hay que comprender primero la estructura por dentro y por fuera, no se la puede apreciar de un solo vistazo y llegar a un entendimiento global; se podría decir que esta tiene dos caras y ambas materializan el concepto abstracto de aspiración hacia el cielo y en ambas la forma de la estructura traza y resalta el recorrido de las cargas, esfuerzos y empujes de forma explícita, donde cada elemento es estrictamente necesaria para la conformación arquitectónica de la obra.

La arquitectura gótica se podría resumir en las ideas de autores como Viollet y Choisy, que expresan:

- Los empujes de las bóvedas se conducen hacia puntos concretos, solu-

ción que se inicia con los arcos fajones románicos y que alcanza su plenitud en los nervios góticos, a manera de un esqueleto, sobre el que se apoya unos segmentos abovedados.

- El arco ojival es el que se utiliza con preferencia, ya que empuja menos en los apoyos que el arco de medio punto.

- Una vez en los apoyos, los empujes horizontales se contrarrestan con arbotantes.

- Las resultantes verticales las soportan las columnas o las molduras insertadas en los pilares.

- Todo el proceso se ejecuta con la intención de dejar explícita la estruc-

tura. (Escriga & Perez, 2004, p. 91)

Sin embargo, admitir todo lo antes mencionado como cierto no es tan sencillo; son muy pocos los debates arquitectónicos respecto a temas estructurales tan variados y controversiales como los que surgieron en torno al Gótico. Se puede analizar la estructura Gótica desde diversos puntos de vista y de diferentes autores que expresan cual es el papel de la estructura en la concepción arquitectónica.

La lectura y la interpretación de la estructura Gótica la inicia Viollet le Duc, para quien esta es absolutamente racional y cada elemento que la constituye representa una función lógica, el teórico Choisy también comparte los criterios de Viollet, pero existen otros autores como el ingeniero Victor Sabouret que realizan una crítica a esta visión estructural, la cual se podría resumir en el título de uno de sus ar-

tículos en 1928 “Las bóvedas de arista sobre nervaduras, papel simplemente decorativo de las nervaduras” y Luis Carlos Curio respalda este criterio realizando estudios desde un análisis estructural expresando que “las nervaduras son arcos y como tales, poseen cierta capacidad portante, más las condiciones estáticas a las que quedan sometidas hacen que ellas sean en general escasas para poder desempeñar la función de órgano maestro que se le atribuyó”.

Torroja afirma que “Estas aristas no son, en realidad, más que líneas de intercepción de dos bóvedas; y el nervio no es imprescindible, en ellas, como elementos resistentes”.

Por otra parte, para Hegel (1818) expresa que la forma fundamental de la catedral gótica no está basada en la sustentación, sino que por el contrario esta idea se supera por el hecho

de que los recintos suben y se reúnen en una punta sin la expresa diferencia entre gravitación y sustentación. Y para Worringuer (1967) la estructura es un medio que está en función de la expresión de una idea.

Estos son solo algunos puntos de vista que se tiene de la estructura gótica, por lo que realizar un juicio específico sobre esta no es muy elocuente, y afirmar un solo enfoque sería muy radical; lo que sí es innegable es que el centro de la arquitectura gótica es la estructura y su expresividad, ya que es entorno a esta que se desarrollan los diversos discursos de su concepción.

1.3. Edad Moderna

Figura 42

Iglesia de San Lorenzo, Florencia, Italia

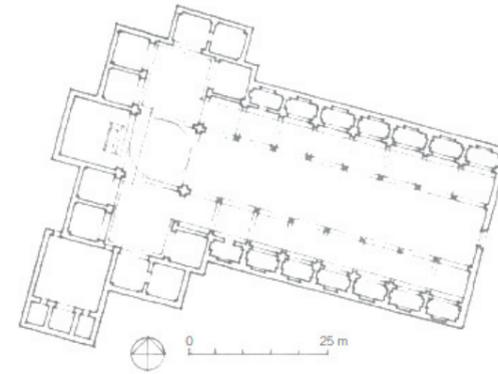


1.3.1. Arquitectura Renacentista

La arquitectura renacentista (XV y XVI) surge en Italia, perdiendo toda conexión con la arquitectura gótica, debido a dos fuertes conceptos que influyen en este movimiento, el clasicismo y el humanismo.

Figura 43

Planta de la Iglesia de San Lorenzo



Nota. Reproducido de *Iglesia de San Lorenzo, Florencia, Italia: planta* (p. 35), por Ching, Francis D. K., 2011, Copyright.

Nota. Adaptado de *Basilica di san Lorenzo*, Por Saiko, 2007, (https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a7/Basilica_di_san_lorenzo_33.JPG). CC BY 2.5

La edad del Humanismo vuelve a emplear los elementos constructivos y decorativos clásicos, pero con una libertad y unas preferencias que llevan a reformular la gramática de la Antigüedad como disciplina universal... Lo que se propone es conseguir un nuevo modelo de construcción en el cual las formas de la arquitectura clásica se empleen libremente para crear nuevos modelos de belleza y armonía. (Alonso, 2012, p. 143)

Con el “redescubrimiento” de los 10 libros de Vitruvio se retomó el mundo de las proporciones y de los órdenes clásicos, y se vuelve al uso del arco de medio punto, la bóveda de caños, la cúpula, etc., característicos de la arquitectura de Grecia y Roma. El uso de estos elementos fue principalmente de carácter ornamental, hasta el propio Alberti en su tratado

De Re Aedificatoria, expone que “la columna es el principal ornamento de la Arquitectura”.

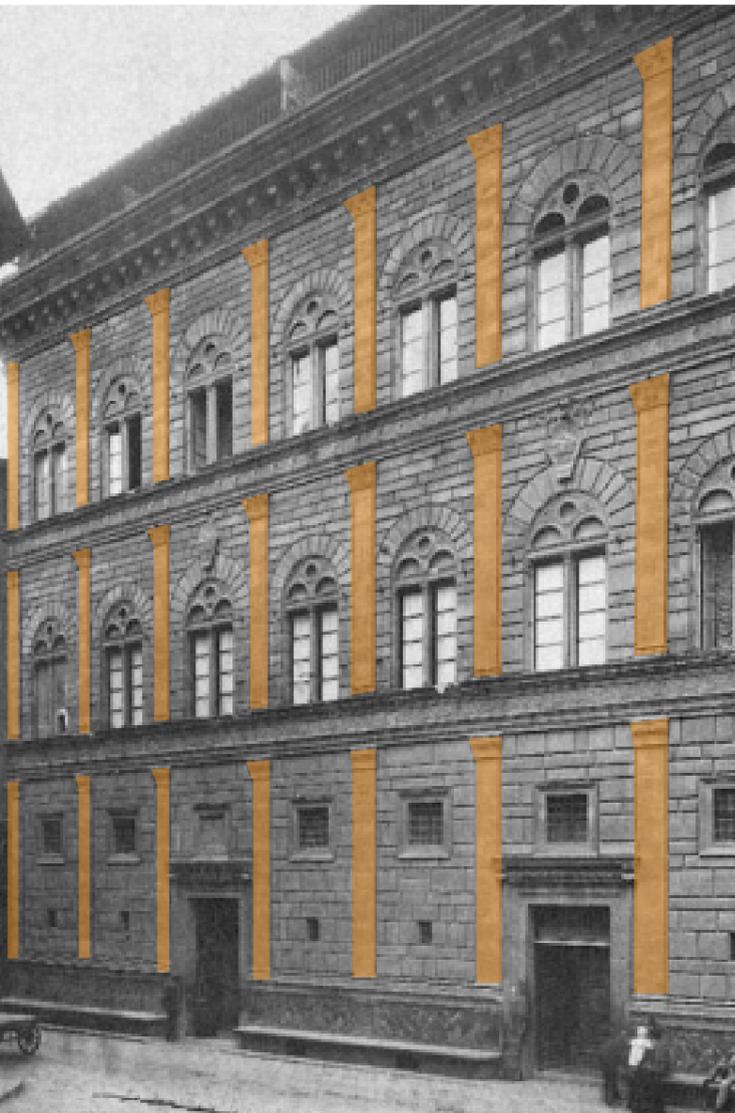
La Basílica San Lorenzo de Brunelleschi es un ejemplo de arquitectura renacentista, donde se exime todo rastro de la arquitectura gótica y se retoman todas las formas clásicas. La Basílica con planta de cruz latina está conformada por una nave central con cubierta plana y dos laterales abovedadas; el peso y los empujes de las bóvedas lo soportan contrafuertes que a diferencia del gótico donde la estructura se dejaba a la vista, aquí se la oculta hacia la fachada de la basílica y se disimulan hacia el interior en capillas.

Brunelleschi como el resto de arquitectos renacentistas persiguieron los ideales de belleza y perfección de la arquitectura clásica, que claramente no los encontraron en la arquitectura gótica; como menciona Laugier (1999) los

contrafuertes son objetos desagradables que manifiestan demasiado el esfuerzo y el trabajo como para exponerlos a la vista, y se prestaría un gran servicio a la Arquitectura disimulando todos esos contrafuertes allí donde resulten indispensablemente necesarios.

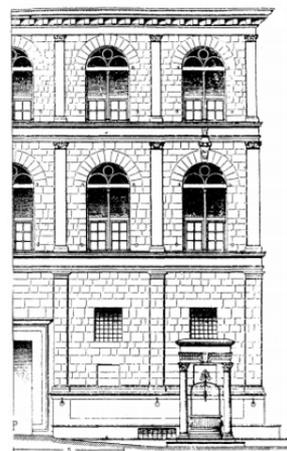
Otros ejemplos se encuentran en edificios cívicos de la época como el Palacio Rucellai en Florencia, un diseño de Alberti, construido por Bernardo Rossellino. La cara principal de la edificación se reviste con una fachada únicamente decorativa, como si fuese una capa que cubriese todo el muro estructural o una especie de vestidura conformada por arcos, arquivoltas y pilastras; todo con función decorativa que contribuyen a establecer un orden geométrico y rítmico a la fachada, pero que nada tiene que ver con una realidad estructural.

Figura 44
Palacio Rucellai



Como estos muchos otros ejemplos (la Iglesia de San Giorgio Maggiore, de Palladio; el Palacio de los Conservadores, de Miguel Ángel;

Figura 45
Decoración en fachada del Palacio Rucellai



Nota. Reproducido de *palais Rucellai de Florence* (p. 667), por A. Choisy, 1899, Copyright.

Nota. Adaptado de *Palacio Rucellai* (p. 41), por J. Summerson, 1984, Copyright.

Santa María Novella, de Alberti; etc.) donde elementos estructurales sirven como ornamento y las verdaderas estructuras se ven ocultas por estos, tomando un papel totalmente pasivo, donde la estructura no es congruente con la apariencia; Scott (1970) manteniendo una posición racionalista afirma:

Cuando los constructores de Renacimiento querían llegar a una forma constructiva, no tenían ningún escrúpulo en emplearla incluso cuando ya no cumplía ningún fin constructivo. Habían subordinado el hecho constructivo deliberadamente y sin vacilación al resultado estético (...) Se apropiaron las formas de una construcción científica para usos puramente decorativos. (p. 88)

La cuestión estructural en el Renacimiento toma más bien un valor emblemático que constructivo, como componentes de un código formal en la concepción arquitectónica, Miguel Ángel menciona “las columnas, colocadas en gran número adornan un pórtico, un muro y cualquier clase de hueco, y de una en una no dejan de resultar decorativas en cualquier lugar, adornan encrucijadas, teatros, plazas, mantienen un trofeo, sirven a fines conmemorativos, poseen belleza y confieren dignidad”.

En este contexto cultural se vuelve a posicionar el valor del lenguaje clásico en la estructura dese una perspectiva ornamental.

1.3.2. Arquitectura Barroca

La arquitectura Barroca rompe con las reglas del Renacimiento estableciendo composiciones basadas en curvas, elipses, espirales,

óvalos y figuras más complejas buscando general movimiento y dinamismo; transforma las formas clásicas de una manera fantasiosa, abandona las líneas rectas y las superficies planas; dando paso a un arquitectura pintoresca como la define Heinrich Wölfflin, quien expresa que: “la belleza ya no se encuentra en la forma reposada, en el ordenamiento tranquilo del cuerpo arquitectónico, sino que se busca el movimiento en las masas cuyas formas parecen molificarse a cada instante debido a sus retozos inquietos, al flujo y al reflujo apasionados” (p. 30)

Si en el renacimiento la estructura queda subordinada bajo la ornamentación, en el Barroco esta subordinación llega a otro nivel, donde la verdadera estructura pasa completamente desapercibida por la sinuosidad que adoptan las formas tanto en espacios internos como externos, y a esto se le suma el uso de la pin-

tura y la escultura como elementos indispensables de la arquitectura Barroca para crear conjuntos exuberantes y teatrales que a nadie dejan indiferente.

En la iglesia San Carlos de las cuatro fuentes de Borromini, se observa que las columnas que adornan la fachada junto con frontones y demás elementos no poseen ningún sentido estructural o constructivo; pero si un sentido formal ya que son elementos que otorgan dinamismo y profundidad a la fachada con entrantes, salientes, que ejercen juegos de luz con el claro-oscuro característico del Barroco.

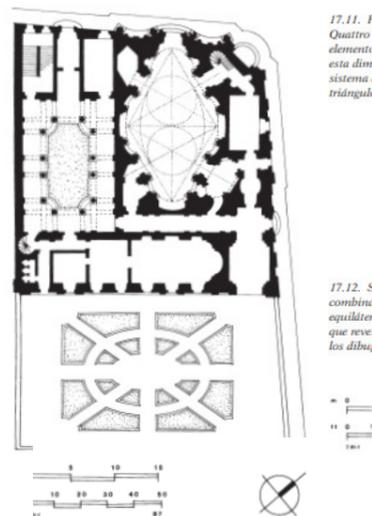
La columna también es utilizada para configurar espacios que persuaden y juegan con los sentidos, como la galería de el Palazzo Spada diseñada por Borromini o la Scala Regia en el Vaticano de Bernini, donde la disposición y el tamaño de las columnas responden a una

Figura 46
San Carlos de las Cutro Fuentes



lógica espacial para crear perspectivas que engañan a los sentidos y que de nuevo nada tiene que ver esta disposición y este tamaño con alguna lógica estructural.

Figura 47
Planta de San Carlos de las Cutro Fuentes



17.11. 1
Quattro
elementi
esta dim
sistema
triangul

17.12. 5
combinu
equilátero
que reve
los dibu

Nota. Reproducido de *San Carlo alle Quattro Fontane. La planta* (p. 401), por L.M. Roth, 1999, Copyright.

Nota. Adaptado de *Roma, San Carlos de las Cutro Fuentes* (p. 157), por Norberg, 1999, Copyright.

La estabilidad y sustentación no están dentro del lenguaje estructural Barroco, los elementos estructurales como en la arquitectura romana y renacentista en su gran mayoría no ejercen una función portante, pero si adoptan un lenguaje plástico que enriquece la arquitectura a manera de ornamento.

1.3.3. Arquitectura Rococó

El Rococó surge a partir del Barroco en el siglo XVII, este estilo fue de carácter mucho más decorativo e interiorista, donde resaltan las pinturas al fresco, revestimientos, estucos, yesos, cielos rasos, y las formas curvas y sinuosas envuelven el espacio.

En lo que respecta a la estructura, las construcciones del Rococó no presentan alguna innovación respecto a periodos anteriores, más bien se reformula el uso de los materia-

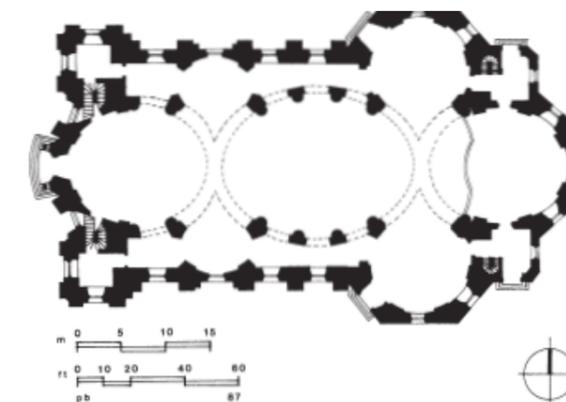
les y las técnicas constructivas, para configurar espacios donde prácticamente todo es un engaño visual por medio de decoraciones recargadas que denotan un gran desinterés por expresar la honestidad estructural.

La Basílica de Vierzehnheiligen de Neumann es un claro ejemplo de la arquitectura Rococó, donde la recarga decorativa devora visualmente a la estructura. En el interior se logra una continuidad espacial, tornándose difícil reconocer donde termina la pared y donde comienza el techo; aspecto peculiar de esta arquitectura.

Además, se crean falsas bóvedas a manera de cielos rasos, las cuales cuelgan de la cubierta; “los interiores de las habitaciones se conformaron entonces con cielos rasos imitando bóvedas esquifadas o cúpulas donde se aplicaban grandes frisos de escayola

dorada de formas rabiosamente asimétricas y curvilíneas”. (Bassegoda, 1984, p. 236)

Figura 48
Planta de la Basílica de Vierzehnheiligen



Nota. Reproducido de *Vierzehnheiligen, Franconia. Planta* (p. 427), por L.M. Roth, 1999, Copyright.

Nota. Reproducido de *Iglesia de los Catorce Santos (Vierzehnheiligen)* (p. 113), por B. Zevi, 1981, Copyright.

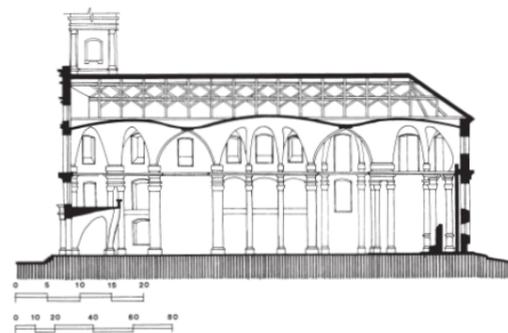
Figura 49
Interior de la Basílica de Vierzehnheiligen



Las columnas aparentemente de piedra, no son más que revestimientos de escayola que pretende simular la materialidad del mármol.

La estructura en el Rococó es prácticamente irreconocible por todas las envolventes dispuestas a manera de carcasa que recubre el edificio y por los fuertes conceptos decorativos de los espacios en este movimiento.

Figura 50
Sección de la Basílica de Vierzeñheiligen



Nota. Reproducido de *Vierzeñheiligen, Franconia. Sección* (p. 427), por L.M. Roth, 1999, Copyright.

Por todo lo descrito la estructura en el Rococó no toma un papel relevante en cuanto al valor formal o funcional en la configuración arquitectónica.

1.3.4. Arquitectura Neoclásica

La arquitectura neoclásica (XVIII – XIX) se presenta como la antítesis del Rococó y busca volver a la fidelidad arquitectónica clásica de Grecia y Roma, con un grado mayor de monumentalidad, sostenida en principios funcionales y depurados donde se suprime el ornamento. Como menciona Kostof (2009):

El blanco al que se oponía esta tendencia, por supuesto, era el opulento sensualismo del barroco, en el que la ilusión, asegurada por cualquier medio, había importado mucho más que la estructura o que la realidad cons-

tructiva. Lo que se estaba rechazando ahora era aquella rica tradición de efectos añadidos: la plasticidad de los muros plegados con columnas y pilas-tras adosadas, animados con sinuosos ritmos y con abundante decoración escultórica y pictórica. El antídoto debían ser muros simples y rectilíneos e hileras de columnas exentas con entablamentos rectos.

Kostof además en su libro *Historia de la arquitectura* expresa las ideas de uno de los teóricos más influyentes del Neoclásico Carlo Lodoli, para quien la arquitectura neoclásica debía basarse en la “Función, entendiendo por tal la forma en que debía comportarse la estructura de un edificio de acuerdo con el uso de ese edificio”(p. 976) .Otros teóricos como Laugier defendía que todos los elementos que conforman la edificación tenían que verdaderamente

servir de sostén para la misma y que la forma debía ser resultado de la lógica estructural.

En el Neoclásico la estructura recupera su funcionalidad constructiva relegada en periodos anteriores, a través de la abstracción clásica de elementos como columnas, frontones, arquivadas, etc., priorizando y valorando la expresión funcional de estos elementos, y despreciando la expresión plástica y decorativa que llegaron a tener los elementos en periodos anteriores.

La iglesia de Sainte Geneviève de Soufflot más conocida ahora como el Panteón de París es uno de los primeros y mayores ejemplos de la arquitectura Neoclásica, que claramente evoca el Panteón de Agripa en Roma y con su cúpula la arquitectura renacentista.

El Panteón de París se desarrolla en una

planta de cruz griega donde las cúpulas y las bóvedas se asientan sobre pechinas que se apoyan en un entablamento continuo, el cual esta sostenido por gigantescas columnas de orden corintio. “Las bóvedas son exactamente lo que pretenden ser, es decir, cáscaras estructurales de piedra labrada, y no un falso techo de escayola colgado de una armadura oculta” (M. Roth, 1999, p. 437).

La fachada principal la conforma un pórtico de orden corintio, donde se “empleó un complejo sistema de armaduras de hierro para reforzar los arcos adintelados ocultos que componen lo que exteriormente parece un entablamento clásico (no fue posible encontrar piedras adecuadas para cubrir las luces entre columnas)” (M. Roth, 1999, p. 438).

Nota. Reproducido del *Panteón actual* (p. 437), por L.M. Roth, 1999, Copyright.

Figura 51
Interior del Panteón de París

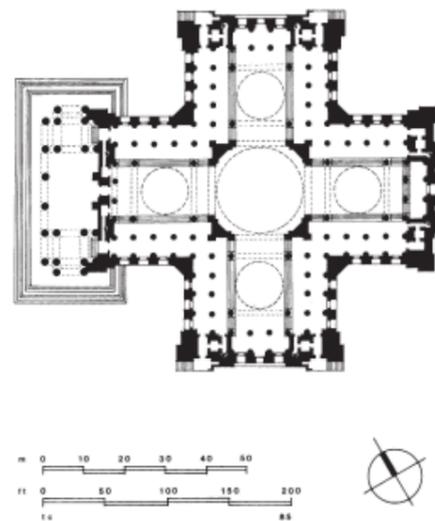


Figura 52
Panteón de París



La arquitectura Neoclásica “es y no es” se desarrolla en un doble discurso donde, por un lado, defiende la honestidad funcional,

Figura 53
Planta del Panteón de París



Nota. Reproducido de *Iglesia de Sainte-Geneviève (el Panteón actual), París* (p. 437), por L.M. Roth, 1999, Copyright.

Nota. Adaptado de *Pantheon of Paris*, 2011, (https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/80/Pantheon_of_Paris_007.JPG). CC BY-SA 3.0

Kostof (2009) afirma:

Las columnas eran miembros funcionales en un principio, y eso es lo que deberían volver a ser... Volver a trazar este desarrollo ayudaría al mundo moderno a despojarse de toda elaboración que no fuese esencial y a lograr de nuevo una arquitectura honesta. (p. 975)

Y por otro lado se encuentra la realidad contextual donde la Revolución Industrial y la Ilustración provocaron un gran cambio en estos siglos, desarrollando mayores conocimientos estructurales, avances en sistemas constructivos, materiales, etc. Volviendo al ejemplo del Panteón de París, Soufflot aplico un sistema constructivo de piedra armada, para lograr la imagen de un entablamento clásico de piedra; corrompiendo de cierta manera la fidelidad a

la arquitectura clásica; a esto se le suma el hecho de que se desconocía que la arquitectura griega era policromada por lo tanto la sinceridad material del mármol blanco no tenía lugar.

En el Neoclasicismo la arquitectura se limita por la recreación de los modelos clásicos y se ignora un nuevo camino para la arquitectura con las nuevas posibilidades constructivas que se estaban desarrollando en este periodo; como menciona Javier Manterola en su discurso de recepción en la Real Academia de Bellas Artes “entre el Panteón de Roma y el de París, separados 1.600 años no ha pasado nada y debía haber pasado algo”. En general no se logra un avance significativo en la arquitectura más que un conocimiento profundo de la estructura, sin embargo, del cual no se saca provecho ya que bien para estos siglos se podría haber avanzado y llegar a dar paso

a una nueva arquitectura verdaderamente revolucionaria, por esto en muchos de los casos esta arquitectura se entendía “como trasplante de la antigüedad en unas creaciones arquitectónicas previstas para nuevos usos” (Martín, 1991, p. 557) ya que claramente se desarrollaron en contextos muy distintos.

1.4. Edad contemporánea

1.4.1. Arquitectura Romántica

La arquitectura del romanticismo (XVIII - XIX) se caracteriza por el surgimiento del historicismo el cual busca volver a estilos consagrados del pasado, que evoca un periodo de la historia local, y se convierte en una arquitectura principalmente de Neos-medievales (Neogótico, Neobizantino, Neorománico, etc.).

El Neogótico fue el estilo que predominó en el Romanticismo, “la aspereza y oscuridad de la arquitectura gótica se correspondían mejor con el deseo romántico de misterio e irregularidad de formas” (M. Roth, 1999, pág. 462). Este “no es sólo un revival estilístico sino el desarrollo de la convicción de que el gótico es técnicamente superior como sistema constructivo” (Aroca, 1999, p. 7).

Ejemplo de esta arquitectura es el Palacio de

Westminster en Londres, que para cualquier persona que no esté relacionada con la arquitectura; este le pueda parecer un estilo Gótico, del tiempo en el cual se edificó Catedral de Notre Dame, cuando en realidad estas dos arquitecturas se encuentran separadas por siglos de diferencia.

A principios del siglo XIX el fenómeno de la industrialización trajo consigo cambios sin precedentes en todos los aspectos: políticos, culturales, religiosos, tecnológicos, constructivos, etc. La sociedad consideraba que estos cambios conducirían a una modernidad sin identidad, que desconocería sus raíces y su herencia, por lo que miraban los nuevos cambios que se estaban dando con algo de incertidumbre a lo desconocido hasta ese entonces; como menciona Lowenthal (1998):

Las ciencias, que miraban hacia ade-

lante, y las artes, que miraban hacia atrás. En ciencia, ingeniería y manufactura, Inglaterra se convirtió en el prototipo de la confianza innovadora de uno mismo. En las artes, la educación, la religión y la política, una ambivalencia preocupante dejó al pasado a veces como un refugio, a veces como una carga. (p.161)

Con esto se asume que en arquitectura el Neogótico, como el resto de “Neos” sirvió para volver al pasado como evasión de un presente no agradable.

Retomando el ejemplo del Palacio de Westminster diseñado por Charles Barry y Augustus Pugin, el cual es una obra arquitectónica que se inspira en el medievo, específicamente en el Gótico; utiliza técnicas constructivas modernas propias de los avances que se gene-

raron en este tiempo. Se utilizó el hierro como “un nuevo material estructural explotado para mejorar los servicios mecánicos del edificio, su capacidad estructural y la seguridad ante los incendios” (M. Roth, 1999, p. 465)

La arquitectura propiamente Gótica como ya se explicó anteriormente se compone de elementos estructurales de piedra como: arcos apuntados, bóvedas de crucería, columnas estribadas, contrafuertes arbotantes, etc. En cambio la arquitectura Neogótica supo aprovechar los nuevos materiales y sistemas constructivos como en el Palacio de Westminster donde el material principal fue el ladrillo y por supuesto el hierro; se utilizó elementos estructurales como muros portantes con hierro fundido, lo que permitió alzar las torres de gran altura del Palacio; los entrepisos se construyeron con arcos de ladrillos apoyados en viguetas de hierro que se descargan sobre

Figura 54
Palacio de Westminster



Nota. Reproducido de *Palacio de Westminster*, por Wallpaperbetter, (<https://www.wallpaperbetter.com/es/hd-wallpaper-to-dzt>). Dominio Público.

columnas igualmente metálicas o sobre los muros, y en las cubiertas se utilizaron cerchas de hierro.

La fachada es claramente reflejo del espíritu Gótico, por todos los elementos y en especial por el material que la conforman, muy bien aparenta ser una obra en piedra, tal y como se construía en la época medieval.

Si bien es cierto en el Romanticismo se dejó en el pasado las técnicas constructivas medievales y se asumieron los avances constructivos propios del siglo, pero aquí la estructura a diferencia del Gótico no se torna la protagonista de la arquitectura; en el Neogótico el fin siempre fue evocar una arquitectura histórica del pasado, por lo que para lograr tal motivo se tuvo que cubrir de piedra todas las edificaciones como un revestimiento, ocultando los verdaderos sistemas y materiales constructi-

vos de este periodo para así mantener la apariencia que se buscaba.

La arquitectura romanticista evoca un aspecto falso que anula la expresión de la estructura tanto formalmente como funcionalmente; sometida a ser algo que en verdad no es y en cierta manera hasta reprimida del gran potencial que va a llegar a tener posteriormente.

1.4.2. Arquitectura industrial

En el siglo XIX las nuevas necesidades que surgieron con la llegada la revolución industrial, género que la arquitectura de un gran paso en cuanto a materiales y sistemas constructivos, cobrando gran protagonismo los edificios industriales como: fabricas, estaciones ferroviarias, talleres, almacenes, etc. que al ser espacios que debían albergar a miles de personas y maquinas requerían edificaciones

de grandes dimensiones.

Desde el tiempo de los romanos, se utilizaron cerchas de madera para cubrir las extensas luces que necesitaba la cubierta, pero gracias al desarrollo tecnológico de los sistemas constructivos del siglo, se llegaron a nuevas soluciones haciendo uso principalmente del hierro, lo cual permitió cubrir las grandes luces con cerchas metálicas más resistentes a los incendios y más ligeras que las de madera.

El uso del hierro como material arquitectónico se extendió con la llegada de las exposiciones universales, de esta manera empiezan a verse los grandes exponentes de la arquitectura de hierro.

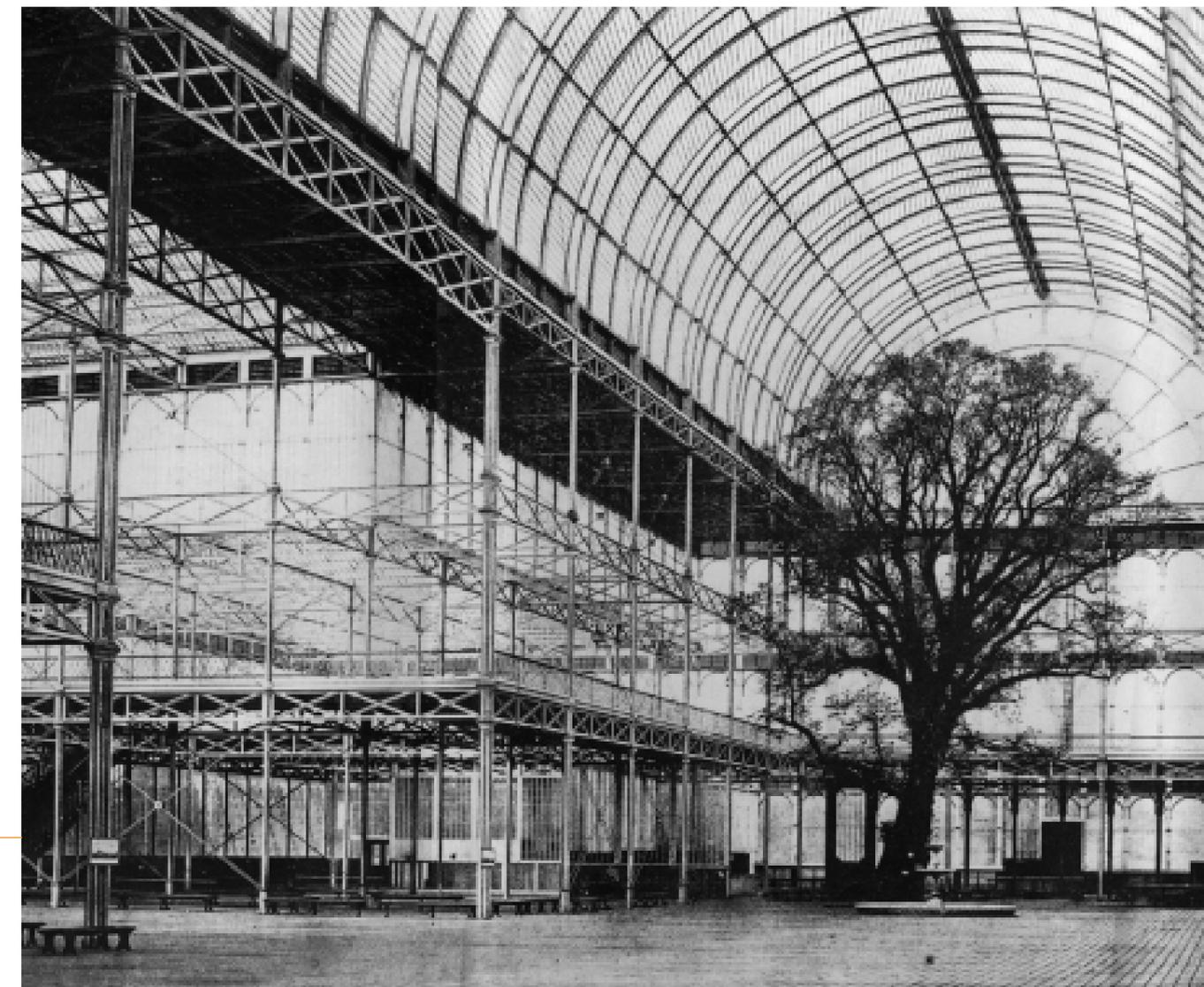
El Palacio de Cristal de Paxton es un ejemplo de este tipo de arquitectura, la edificación fue construida para la Gran Exposición Mundial de

1851 en Londres, que “constituye una auténtica síntesis arquitectónica de la Revolución Industrial por cuanto utiliza el hierro y el vidrio a gran escala, con una lógica aditiva modular, realizando la estandarización de componentes propia del nuevo sistema productivo industrial” (López, 2014, p. 77). Además, una vez terminada la exposición el edificio se podía desmontar y ser trasladado a otro lugar.

La importancia del Palacio de Cristal no consiste en la resolución de importantes problemas estáticos, ni siquiera en la novedad de los procedimientos de prefabricación y en los detalles técnicos, sino en la nueva relación que se establece entre los medios técnicos y los fines representativos y expresivos del edificio. (Benévolo, 1979, p. 154)

Nota. Reproducido de *Crystal Palace*, por McKean, 1994 (http://openarchive.icomos.org/id/eprint/15111/1/RITA_Isaac_Lopez.pdf). Copyright.

Figura 55
Palacio de Cristal



El Palacio de Cristal como muchas otras galerías son parte la arquitectura industrial, una arquitectura que deja de emplear muros portantes otorgando mayor transparencia y simplicidad al proyecto, reapareciendo la estructura como un elemento explícito y visible; donde el diseño no tiene un objetivo estético, sino que busca llegar al utilitarismo que necesitaban las contracciones de la época, encaminándose por la economía del proyecto y por la influencia de la máquina.

La arquitectura industrial expone a la estructura de una manera cruda nunca antes vista, por lo que los observadores no tardaron en darse cuenta de que las reglas según las cuales habían juzgado hasta entonces la arquitectura no eran ya válidas. Henry Cole uno de los impulsores de las exposiciones describe el equilibrio entre técnica, industria y arquitectura:

Ni exclamación retórica, ostentando

estructuras sensacionales, ni desconfianza iteraría, enmascarando las estructuras con decoraciones de estilo, sino franca aceptación de los productos fabricados en serie y rígidas limitaciones económicas, que esta vez han contribuido al resultado arquitectónico en gran manera. (Benévolo, 1979, p. 156)

1.4.3. Arquitectura moderna

La arquitectura moderna en el siglo XX está estrechamente relacionada con la estructura ya conocida en hierro y ahora también con la aparición del hormigón.

El hormigón armado supuso una nueva revolución en temas constructivos ya que brindó diferentes posibilidades formales en las con-

cepciones arquitectónicas, aumentando su utilización y desarrollo en el periodo de entreguerras por los altos costos en que se dispararon los materiales.

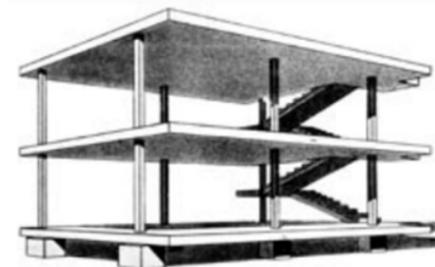
Dos de las premisas de la arquitectura moderna son las formas geométricas y la ligereza ya que se eliminan los muros de carga con el uso de columnas y vigas, utilizándose superficies vidriadas como cerramiento, lo que logra reducir de gran manera la imagen de pesadez que estos producían.

Con estas técnicas modernas para aquel entonces, se conforma una nueva arquitectura que rechaza definitivamente los órdenes de la arquitectura antigua y depura las expresiones plásticas.

El prestigio que adquirió la técnica genera una estética que se desvincula de valores tradicio-

nales. En la arquitectura moderna se genera una independencia estructural relativa entre la estructura y la fachada. En planta toma protagonismo la estructura de pilares o columnas ya que concede a la estructura un carácter autónomo en el espacio marcando de manera reticular con pórticos regulares la estructura portante; mientras que las superficies de vidrio se apoderan en fachadas.

Figura 56
Sistema Dom-ino de Le Corbusier



Nota. Reproducido de *Le Corbusier "Dom-ino"*, (p. 191), por Norberg, 1999, Copyright.

Nota. Adaptado de *Villa Savoye*, por Valueyou, 2008, (<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/3/3c/VillaSavoye.jpg>). CC BY-SA 3.0

Figura 57
Villa Savoye



Ludwig Mies van der Rohe expresa que: Los rascacielos revelan su atrevido modelo estructural durante la construcción. Sólo entonces impresiona su gigantesca trama de acero. Cuando se colocan las paredes exteriores, el sistema estructural que es la base de todo diseño artístico, queda oculto tras un caos de formas triviales y sin sentido. (Murcia, 1992, p 21)

Erich Mendelsohn comparte este criterio diciendo “El esqueleto, allí donde se encuentra aun sin revestir, muestra de manera más clara y majestuosa la audacia de la estructura de acero y hormigón armado que no la obra terminada” (Zevi, 1982).

Por otra parte, Le Corbusier no elogia la expresión de la estructura, sino la medida en que esta permite construir formas con mayor

libertad; ejemplo de esto es el sistema estructural estandarizado que diseño llamado Dom-ino, buscando crear espacios con libre disposición de los elementos en su interior. Le Corbusier no busca exponer a la estructura en un primer plano visual, sino que la expone de forma activa en el interior de la obra donde los pilares no se ocultan, sino que se exhiben como elementos abstractos.

Los movimientos arquitectónicos que se desarrollaron después de la arquitectura moderna son muchos y por ende, muy variadas las concepciones de la estructura en los diversos diseños arquitectónicos. Sí en las épocas anteriores la arquitectura se encontró bajo condiciones constructivas, económicas y técnicas, el avance y desarrollo actual respecto a técnicas y sistemas constructivos hacen que dichas condiciones hoy en día sean irrelevantes, ya que casi cualquier planteamiento for-

mal puede llegar a ser resuelto y construido, generando una situación de total libertad en las concepciones del diseño arquitectónico.

Por tales motivos, se puede decir que la arquitectura actualmente puede materializar lo que al arquitecto se le ocurra, por tanto, existen un sin número de obras arquitectónicas que exponen el potencial expresivo de la estructura en la arquitectura contemporánea en los distintos estilo y formas que toman los diseños.

Para no caer en propuestas banales y carentes de contenido, el arquitecto tiene que estar consciente del papel que juega la estructura en el diseño arquitectónico ya que como se ha descrito anteriormente en un breve resumen a través de la historia la estructura toma valores formales, expresivos y constructivos en el diseño materializando las ideas del proyecto; es por ello que en el siguiente capítu-

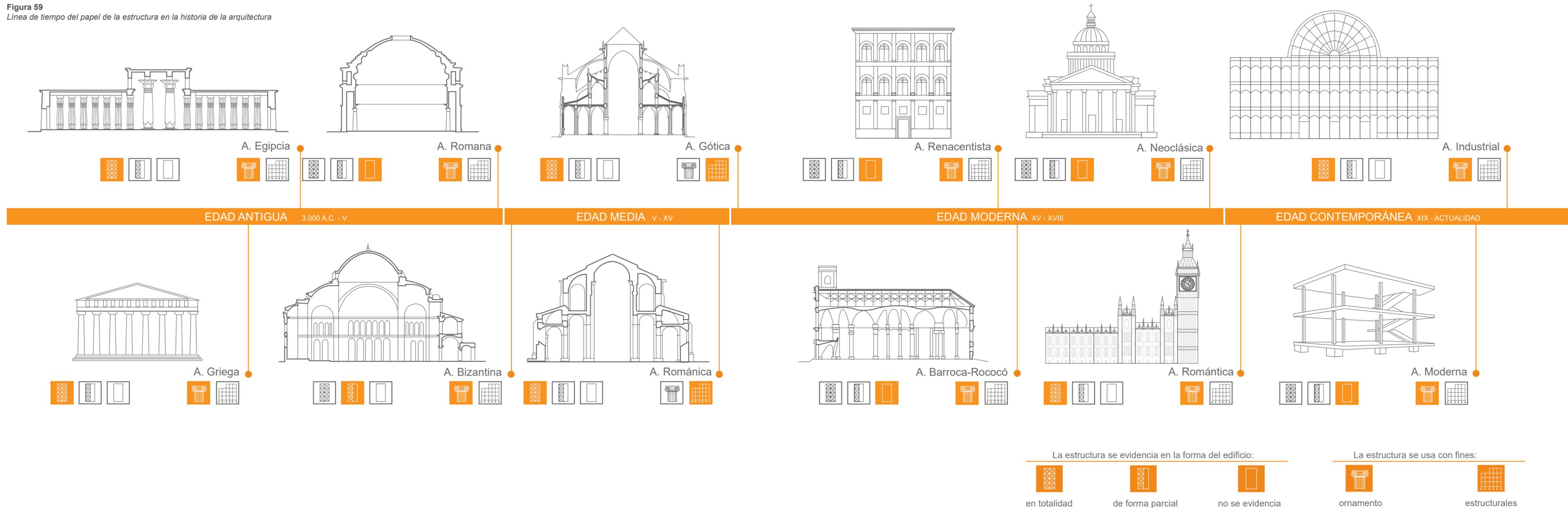
lo se abordarán cuatro estrategias de diseño estructural , estableciendo un análisis que aporte al conocimiento de los estudiantes sobre las posibilidades de la estructura en el diseño de un proyecto, que sirva como guía e inspiración para poder proponer diseños que resulten adecuados para sus proyectos.

Figura 58
Edificio 30 St Mary Axe



Nota. Adaptado de 30 St Mary Axe, por Foster + Partners, 2004, (<https://www.fosterandpartners.com/projects/30-st-mary-axe/#-gallery>). Copyright.

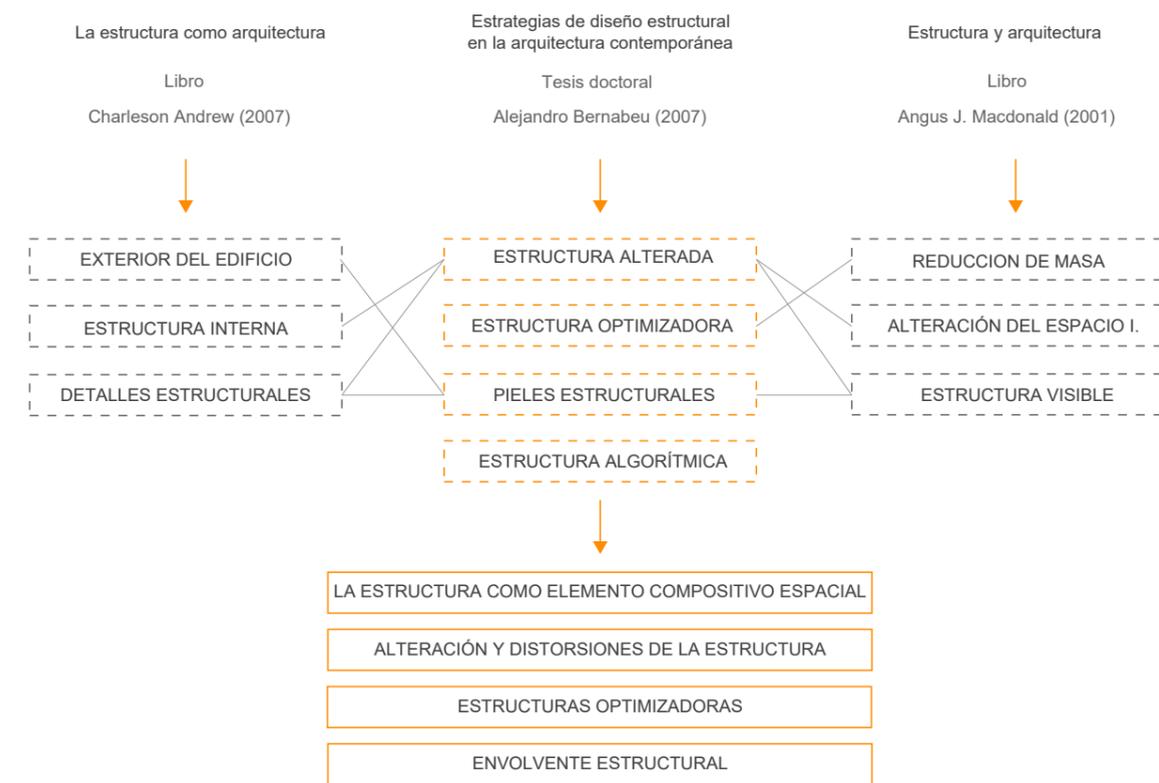
Figura 59
Línea de tiempo del papel de la estructura en la historia de la arquitectura



Capítulo 02

Estrategias generales de diseño estructural

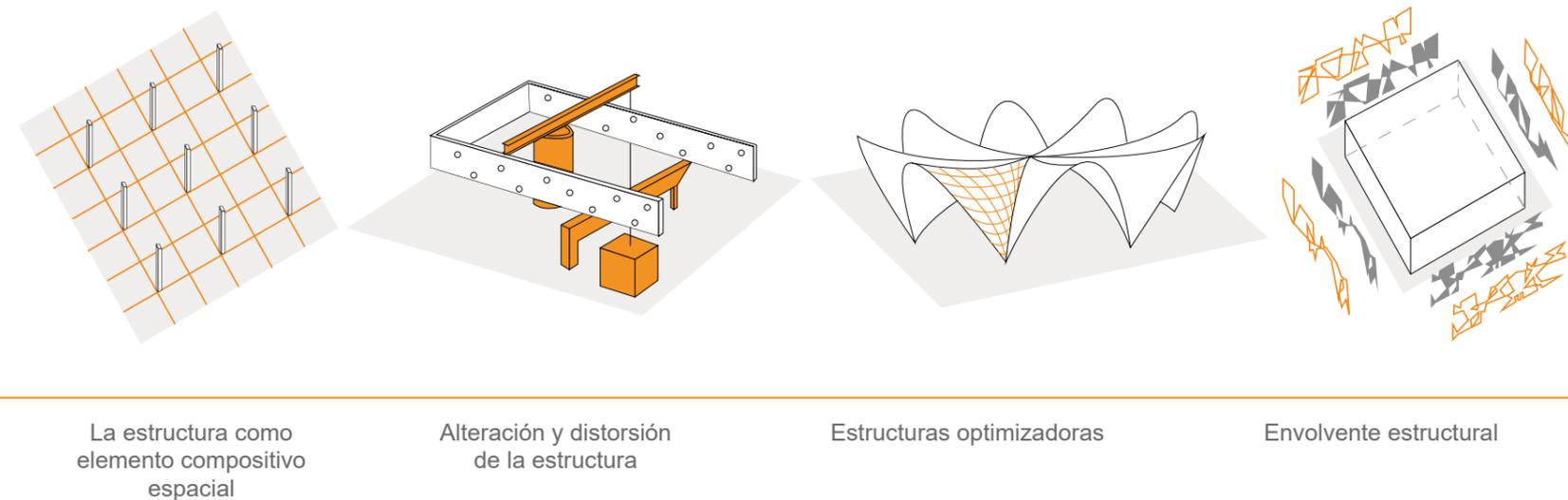
Figura 60
Selección de las estrategias de diseño estructural



En esta segunda parte de la investigación se exponen estrategias de diseño estructural que se han tomado con base a las estrategias expuestas en la tesis doctoral de Alejandro Bernabeu *Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea* (2007) y se han complementado con información del libro *La estructura como arquitectura* (2007) de Charleson Andrew y el libro *Estructura y arquitectura* (2001) de Angus J. Macdonald, relacionando la clasificación que dan los distintos autores a la estructura en sus libros con las estrategias ya dadas por Bernabeu, definiendo así 4 estrategias generales de diseño estructural que se expondrán en este capítulo:

- **La estructura como elemento compositivo espacial,**
- **Alteración y distorsiones de la estructura,**
- **Estructuras optimizadoras y**
- **Envolvente estructural.**

Figura 61
Estrategias de diseño estructural



2.1. La estructura como elemento compositivo espacial

La estructura es la encargada de brindar resistencia y asegurar la estabilidad en la construcción de un proyecto, soportando los esfuerzos y transmitiendo las cargas al suelo. Esta función estático-resistente queda justificada por su condición inherente y necesaria en el proyecto; pero la estructura más allá del valor en su función resistente es capaz de determinar la configuración y composición del espacio por su realidad física y la posición que toman en el proyecto. Es así como la estructura no necesariamente tiene que ser un elemento indiferente en la concepción formal de un proyecto arquitectónico, sino que puede participar de manera activa en el diseño espacial de este.

La estructura puede ser columnar, plana o una combinación de ambas que el diseñador utiliza conscientemente para reforzar o plasmar sus ideas. Moviéndonos en este contexto, los pila-

res, los muros y las vigas pueden considerarse en función de los conceptos de frecuencia, modelo, simplicidad, regularidad, azar y complejidad. La estructura sirve para definir el espacio, crear las unidades, articular la circulación, sugerir el movimiento o desarrollar la composición y los módulos. De esta manera se vincula intrincadamente con los elementos que generan arquitectura, su cualidad y su emoción. Este aspecto tiene una energía que fortalece al que analiza la iluminación natural, las relaciones entre la unidad y el conjunto, y la geometría. Refuerza igualmente la relación de la circulación con el espacio-uso y la definición de la simetría, del equilibrio y de la jerarquía. (Clark & Pause, 1997, p. 3)

La malla es la forma más básica y común a la hora de diseñar en arquitectura ya que en primera instancia no se necesita de un ingeniero para mayores cálculos estructurales. Además, temas estructurales para estudiantes de arquitectura e incluso para los mismos arquitectos pueden resultar indiferentes y ser tomados únicamente como condicionantes y requisitos a cumplir y solucionar para la ejecución de un proyecto, sin prestar interés en el potencial que puede tener dentro del diseño.

Sin embargo, contrario a esta forma común de concebir la estructura, existen múltiples posibilidades en donde esta toma presencia en el proyecto cobrando ritmo propio en el espacio, volviéndose relevantes en la composición y siendo capaz de contribuir en la estética del proyecto.

2.1.1. Disposición de la estructura en el espacio

La malla o retícula es un patrón de líneas rectas, generalmente equidistantes y perpendiculares entre sí que marcan en sus intersecciones puntos en un plano.

En el proyecto arquitectónico suelen utilizarse las retículas como dispositivo de orden, no solo para localizar, sino también para regular los elementos principales de una planta. Por tanto, cuando hablamos de retícula estructural nos referimos específicamente a un sistema de líneas y puntos que sitúan y regulan la posición de los elementos estructurales principales, como es el caso de pilares y muros de carga. (Ching F. D., 2009, p. 44)

Si bien es cierto en el proyecto arquitectónico, las retículas son instrumentos determinantes de la organización; pero también pueden aportar en la configuración espacial y estética; según los distintos requisitos planteados en la concepción del proyecto arquitectónico.

Según lo establece Ching en el Manual de estructuras ilustrado, para diseñar una retícula estructural para un proyecto arquitectónico, se deben considerar una serie de características importantes de la retícula, como la proporción, la longitud y la escala, por lo que las divide en dos: retículas regulares y retículas irregulares.

2.1.1.1. Retículas regulares

Las retículas regulares son aquellas que permiten el uso repetitivo de los elementos estructurales debido a que las luces que salvan son todas iguales o similares.

Figura 62
Retículas regulares

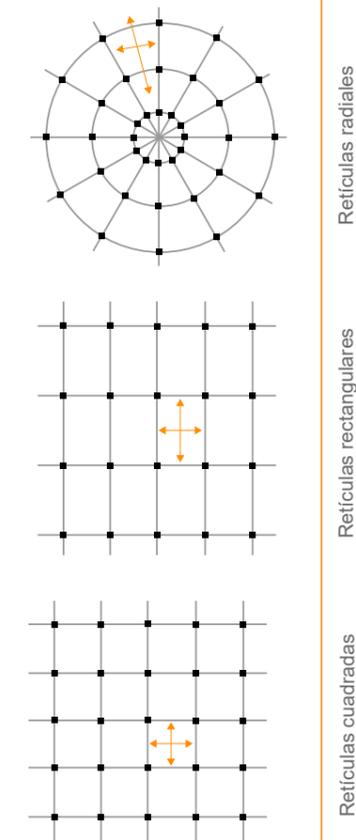


Figura 63

Columnas de las oficinas de Johnson Wax



A pesar de que la configuración de las retículas regulares en simple y básica se puede potencializar la estructura en la composición espacial y estética del proyecto, así por ejemplo el edificio de oficinas Johnson Wax, de Frank Lloyd Wright son algunas de las obras que ejemplifican el papel compositivo y formal que puede llegar a tener la estructura en el diseño de los espacios. En este último el arquitecto Frank Lloyd Wright creó un gran espacio abierto para oficinas sin divisiones internas llamado “la gran sala de trabajo” donde las 60 columnas dendriformes de 6,5m de altura, 23 cm de diámetro en la base y 5.5 cm de diámetro en la parte superior a la que Wright denominó “nenúfar” son indudablemente las protagonistas del proyecto y conforman una malla cuadrada.

La idea del arquitecto fue diseñar un espacio donde cada uno de los trabajadores podría

Nota. Adaptado de *The Johnson Wax headquarters in Racine*, 2020, (<https://outoffice.room.com/open-office-plan-history/>). Copyright.

Figura 64

Sala de conferencias de la Staatsgalerie



sentirse como en un bosque de pinos respirando aire puro inundado de luz en un edificio herméticamente cerrado. Esta idea se cristalizó mediante la forma y disposición que toma la estructura en el proyecto; como si de troncos de árboles se tratase las columnas generan el ambiente deseado por el arquitecto, quien sacó provecho del potencial formal-compositivo que posee la estructura.

La Staatsgalerie de Stuttgart, de James Stirling, E., utiliza en Sala de exposiciones temporales una malla rectangular que salva una gran luz mediante pilares circulares con cabezas de punzonamiento de gran tamaño. En ambos ejemplos expuestos a las columnas se les da un tratamiento escultórico, llegando a tomar protagonismo en el espacio.

El terminal del aeropuerto de Stuttgart está construido en base a una malla donde las

Nota. Adaptado de *Sala de conferencias*, por Staatsgalerie, 2016, (<https://www.staatsgalerie.de/museum/raeume-mieten.html>). Copyright.

Figura 65
Columnas del Aeropuerto de Stuttgart

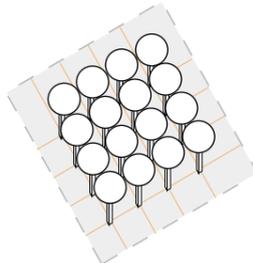
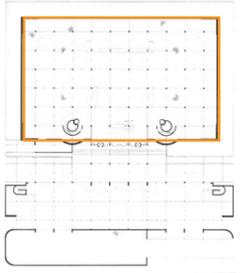
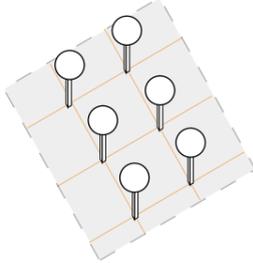
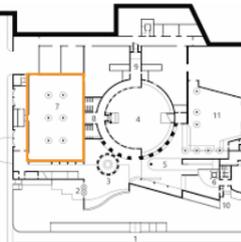
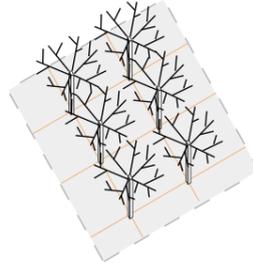
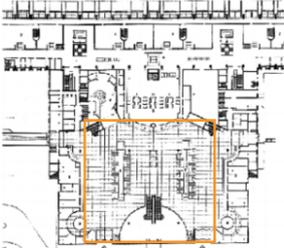


bandas de los lucernarios subdividen en doce módulos el plano de la cubierta inclinada, los cuales se apoya en una estructura con forma de árbol.

Estos árboles, todos de la misma altura, soportan unos forjados que saltan una planta cada vez. Los troncos constan de cuatro tubos estructurales de acero, paralelos y conectados entre sí, que se doblan para convertirse primero en ramas principales y luego se bifurcan en racimos de tres o cuatro ramas secundarias cada vez más pequeñas. Finalmente, hay 48 ramitas que soportan una retícula ortogonal de vigas. Cada marquesina arbórea contribuyen a crear un espacio interior interesante y singular. (Charleson, 2007)

Nota. Adaptado de *Interior del aeropuerto de Stuttgart*, por M. Rehak, 2015, (<https://de.dreamstime.com/innenraum-von-stuttgart-flughafen-image131331811>). Copyright.

Figura 66
Ejemplos de retículas regulares en la arquitectura

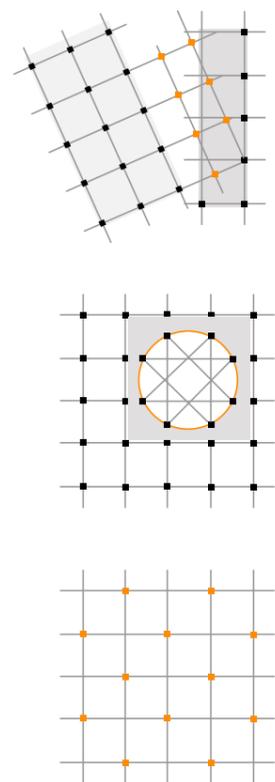
Reticulas regulares	Proyecto	Arquitecto	Planta A.	Imagen
	Oficinas Johnson Wax	Frank Lloyd Wright		
	Staatsgalerie de Stuttgart	James Stirling, E		
	Aeropuerto de Stuttgart	Meinhard Von Genkar		

Reticula cuadrada

Reticula rectangular

Reticula rectangular

Figura 67
Retículas irregulares



Contraste de orientaciones

Contraste de geometrías

Disposiciones irregulares

2.1.1.2. **Retícula irregular**

La retícula irregular surge como una alteración de la retícula regular donde se modifica la disposición de los puntos en la malla, generando ritmo propio y una nueva perspectiva en el espacio. Con esta retícula se puede cambiar la manera común de disponer las columnas o los distintos elementos estructurales en el espacio, dotando al proyecto de un nuevo carácter compositivo, en palabras de Cecil Balmond cuando las columnas salen de la malla el espacio deja de ser “aburrido y poco inspirado”.

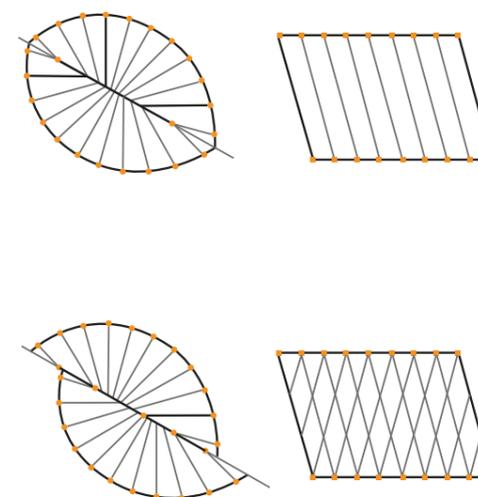
- **Disposiciones irregulares.** Muchas veces cuando se trabaja con espacios con geometría irregular resulta difícil establecer criterios de orden estructural por lo que es importante primero reconocer esta geometría inherente del espacio a trabajar para empezar a pensar en una estrategia de sistema estructural.

Las formas en planta pueden desarrollarse de modo que no se ajusten o se puedan incorporar a una geometría rectilínea o curvilínea clara, como un ovoide o un paralelogramo. Un posible método consiste en seleccionar o crear un borde significativo o una condición lineal a partir de los cuales pueda orientarse la retícula o el sistema de forjados. (Ching F. , 2009, p. 67)

En los siguientes diagramas de retículas irregulares en plantas se puede observaren tan solo algunas de las múltiples posibilidades que se pueden desarrollar en base a disposiciones irregulares.

- **Contraste de geometrías.** Para el diseño de los espacios no solamente se puede trabajar con un tipo de geometría, sino también se puede crear contrastes incorporando geo-

Figura 68
Disposiciones irregulares

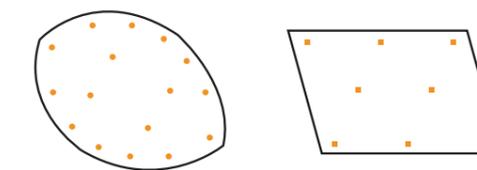
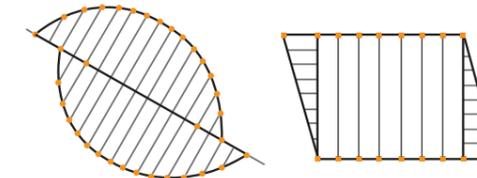


Este paralelogramo ofrece la posibilidad de organizar el forjado en paralelo a unos bordes u otros, manteniendo constantes las luces.

Imponer un esquema estructural radial en esta planta ovoidal enfatiza su curvatura con la posibilidad de trasladar la cualidad curvilínea a la dimensión vertical.

Reconocer la geometría del paralelogramo puede dar lugar a una diversidad de entramados estructurales.

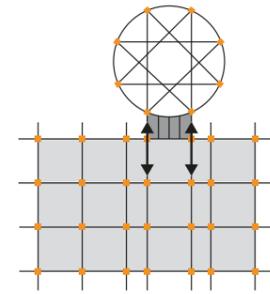
Cuando se desplaza una forma irregular, puede crearse un eje principal de apoyo a lo largo del plano de desplazamiento y organizar la estructura perpendicular a esta o siguiendo el borde irregular.



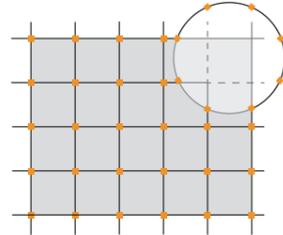
Disponer el forjado perpendicular a los bordes regulariza la estructura y deja unas secciones triangulares en los extremos que pueden organizarse de manera diferente.

La flexibilidad de la posición de los pilares en un forjado de losa de hormigón permite crear plantas de forma irregular y también responder a una variedad de configuraciones de espacios interiores.

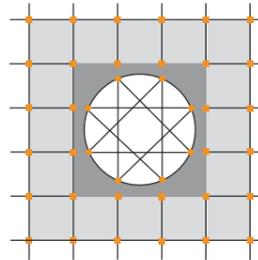
Figura 69
Contraste de geometrías



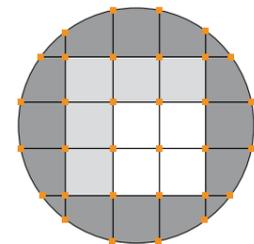
Geometrías dispersas separadas pero conectadas



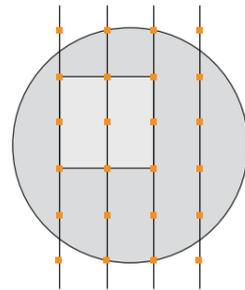
Geometrías solapadas



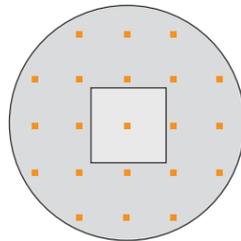
Geometría circular integrada dentro de una rectangular



Geometría rectangular dentro de una circular



Geometría rectangular dentro de una circular



Geometría rectangular integrada dentro de una circular

metrías distintas, según sea el concepto de diseño y los requisitos formales del proyecto. Existen algunas maneras de resolver el contraste de geometrías.

- Las dos geometrías pueden permanecer separadas y establecer una conexión por medio de un tercer sistema estructural.

- Las dos geometrías pueden superponerse, y una de ellas puede someter a la otra o se pueden combinar para formar una tercera estructura.

- Una de las dos geometrías puede inscribirse a la otra en su matriz.

- **Contraste de orientaciones.** Así como se puede contrastar la geometría entre dos retículas estructurales, también se puede esta-

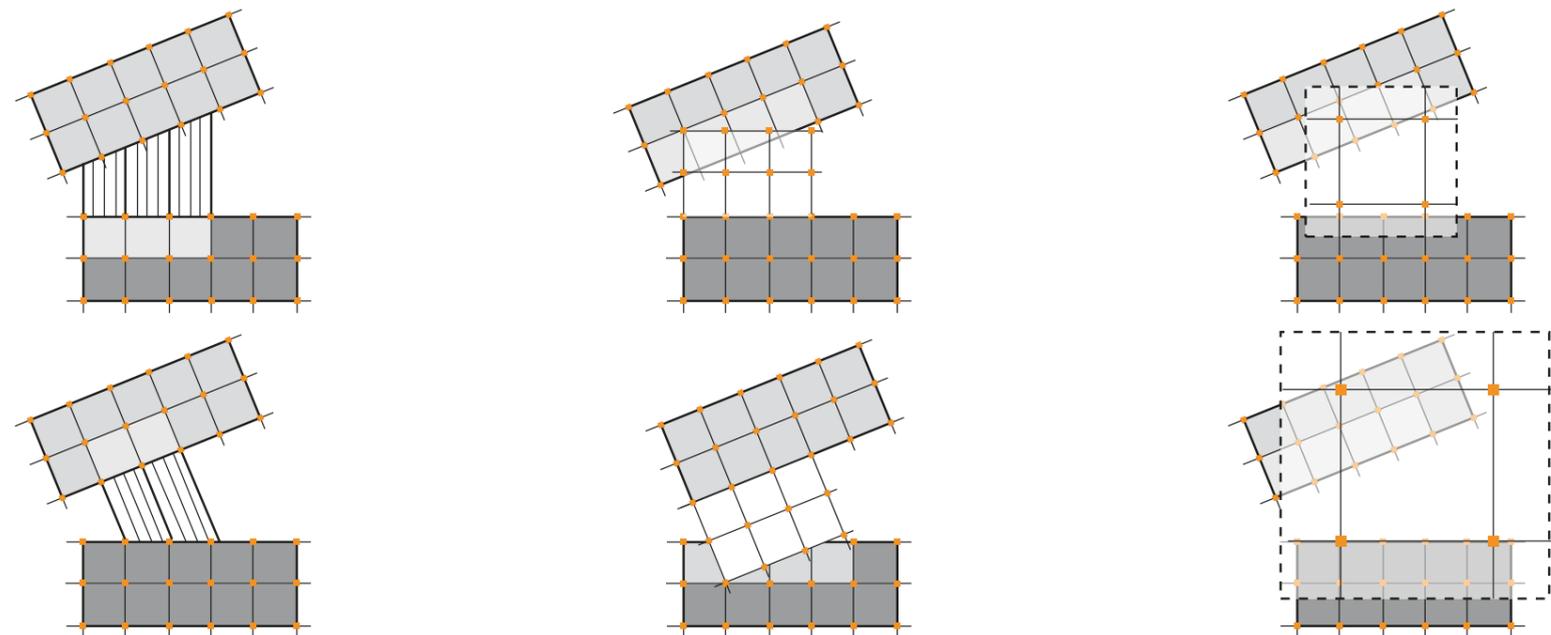
blecer orientaciones distintas para soluciones de espacios con características singulares, acoplando formas, recorridos y funciones dentro de un solo esquema compositivo. Según Ching como describe en el Manual de estructuras, existen tres maneras de resolver la unión de dos retículas que se encuentran en distintas orientaciones en una única estructura.

- Las dos retículas pueden estar separadas entre sí y a su vez conectarse por un tercer sistema estructural.

- Las dos retículas pueden estar superpuestas y una puede someter a la otra o se pueden combinar para crear una tercera estructura.

- Una de las dos retículas puede inscribirse a la otra en su matriz.

Figura 70
Contraste de orientaciones



El elemento de transición entre dos orientaciones geométricas puede reflejar alguna de ellas o ninguna. Si el espacio de conexión se adapta a una de ellas, se tenderá a enfatizar la otra orientación.

Orientaciones dispares pueden hacer que el forjado del espacio de transición tenga características singulares.

Cuando dos retículas de orientación diferente se solapan, una tiende a dominar sobre la otra. La ascendencia de una retícula puede enfatizarse más aún mediante un cambio en la escala vertical.

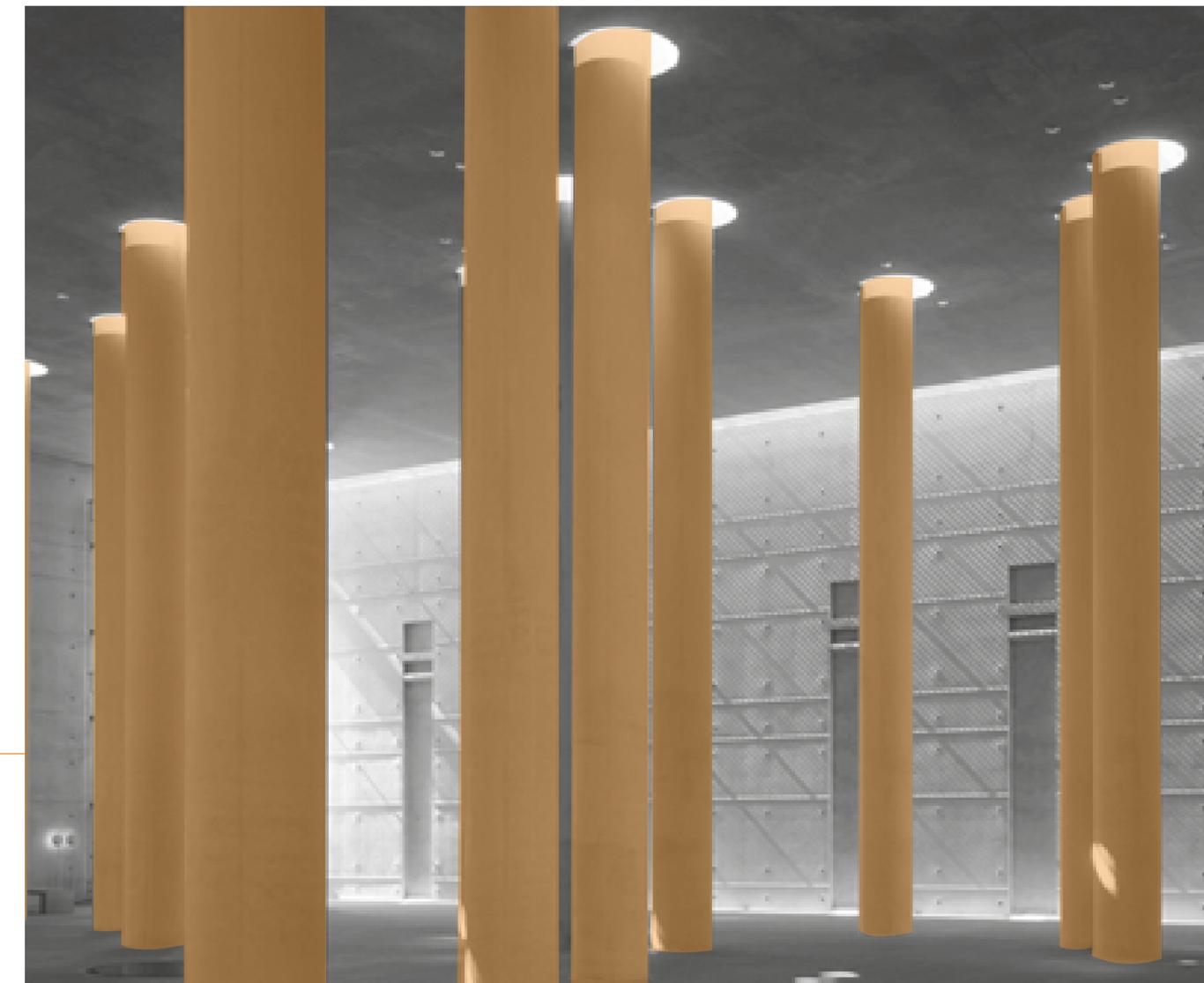
El mayor énfasis estructural y arquitectónico se localiza en los espacios excepcionales donde pueden experimentarse ambas geometrías.

Otra manera de tratar las orientaciones diferentes consiste en unificar ambas partes incorporándolas dentro de una tercera forma estructural dominante.

Como los ejemplos de arriba, se enfatiza la condición excepcional donde se yuxtaponen dos sistemas estructurales diferentes.

Figura 71
Columnas del Crematorio Baumschulenweg

Ejemplo de la retícula irregular es el Crematorio Baumschulenweg en Berlín, diseñado por el estudio de arquitectura Shultes Frank Architekten. La disposición de los pilares en la sala de condolencias se dispone de manera casi aleatoria por el espacio, lo que brinda un nuevo y diferente carácter al proyecto configurando el área de manera tal que rompe con los recorridos lineales comunes y genera circulaciones dinámicas creando subespacios que invitan al recogimiento y a la intimidad.



Nota. Adaptado de *Crematorio Baumschulenweg*, por W. Huthmacher y R. Görne, (https://www.schultesfrank.de/en/portfolio_page/crematorium-baumschulenweg/). Copyright.

Figura 72

Columnas de la Galería Kunsthal



El museo y galería Kunsthal diseñado por la Oficina de Arquitectura Metropolitana, en colaboración con Marco Chow, Angus Dunn y Mariah Palantzas, está conformada por una serie de espacios independientes con una identidad única conectados por medio de la circulación vertical, concebidos como una idea de una secuencia cinematográfica por lo que cada espacio cuenta con distintos requisitos que se resolvieron mediante retículas, donde la disposición estructural responde y es el resultado de la concepción formal arquitectónica

En la Biblioteca en Tama de la Universidad de Arte diseñada por el arquitecto Toyo Ito, la plata cuadrada con dos de sus lados curvos, traza una geometría irregular en planta.

La estructura, que es definida mediante las líneas curvilíneas de esbeltos arcos que arrancan desde los cuatro lí-

Nota. Adaptado de *Galería 1. Vista interior* (p. 267), por A. Bernabeu, 2015, Copyright.

Figura 73

Interior de la Biblioteca de la Universidad de Tama



mites de su forma, se repite a sí misma en forma de nuevas líneas curvilíneas hacia su interior. De esta estructura resulta una gruta, mallada y curvilínea, de arcos de hormigón. (Pérez, 2012)

La disposición de la estructura curvilínea en la que se cruzan arcos, todos distintos unos de otros; se conciben por la idea del arquitecto de crear un espacio natural a manera de gruta “nosotros todavía intentamos construir un espacio que recordase una gruta por el tallado del volumen” (Ito, 2007).

La estructura de arquerías dispuestas en las tres plantas de la edificación otorga al espacio múltiples perspectivas que crean dinamismo en las plantas y los recorridos, llegando a determinar la composición global del proyecto y volviéndose el elemento principal de la forma arquitectónica.

Nota. Adaptado de *Biblioteca de la facultad de arte de la Universidad de Tama*, por I. Baan, (<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/707037/biblioteca-de-la-facultad-de-arte-de-la-universidad-de-tama>). Copyright.

Figura 74
Ejemplos de retículas irregulares en la arquitectura

Retículas irregulares	Proyecto	Arquitecto	Planta A.	Imagen	
	Crematorio Baumschulenweg	Shultes Frank Architekten			Disposición irregular
	Biblioteca en Tama de la Universidad de Arte	Toyo Ito			Contraste de geometría
	Museo y Galería Kunsthal	Rem Koolhaas			Disposición irregular

2.2. Alteración y distorsiones de la estructura

Las distorsiones estructurales se plantean como una estrategia compositiva en el diseño, contraria a concebir a la estructura en su noción de estabilidad y resistencia, alterando la lógica del comportamiento estructural para generar cierto desconcierto sobre su funcionamiento que no deja a nadie indiferente.

En este contexto la estructura toma relevancia en el diseño ya que configura el espacio de una manera provocativa que sin duda atrae y dirige la atención de las personas sobre esta. La distorsión estructural se plantea desde el inicio en la idea conceptual del proyecto y siempre en cooperación con el ingeniero para que esta idea se pueda materializar y no cambie drásticamente luego.

En este sentido, las alteraciones de la estructura son en realidad verdaderas provocaciones que buscan llamar la

atención del espectador, generando configuraciones o sistemas poco frecuentes que le resulten desconcertantes. Se busca así despertar su interés y curiosidad, provocándole de tal manera que los distintos espacios no le dejen en modo alguno indiferente. (Bernabeu, 2007, p.60)

El Crematorio Baumschulenweg, es también un ejemplo de la distorsión estructural; desde un inicio en el proyecto se consideró a la estructura como un elemento formal compositivo en el espacio donde “los pilares con sus capiteles de luz ponen este espacio -5000 años- en la única referencia posible: en el contraste de una cosmología de la tierra apilada conmovedora y el sol con su luz” (Schultes, 2017).

Los apoyos entre la losa y las columnas son una zona estructuralmente crítica, la distor-

Figura 75
Capiteles de luz, Crematorio Baumschulenweg



Nota. Adaptado de *Crematorio Baumschulenweg*, por W. Huthmacher y R. Görne, (https://www.schultesfrank.de/en/portfolio_page/crematorium-baumschulenweg/). Copyright.

Figura 76
Espacio interior de las Termas de Vals



sión en este caso consiste en que el forjado presenta una apertura en forma de corona circular que impide el apoyo directo de la losa sobre los pilares. Estos orificios en los puntos de apoyo producen la impresión de que el forjado está flotando, cuando en realidad los pilares y la losa se conectan a través de pequeñas ménsulas. Las aperturas en la losa permiten el paso de la luz, cubriendo los pilares de hormigón, aumentando la sensación de grandeza deseado en el espacio.

Algo similar sucede en las Termas de Vals diseñadas por el arquitecto Peter Zumthor, aquí las cubiertas de las diferentes unidades no se unen, sino que dejan pequeños espacios cubiertos con vidrio entre las losas y los gran-

Nota. Adaptado de *Peter Zumthor – Las Termas de Vals*, (<https://sobrearquitecturas.wordpress.com/2014/05/06/peter-zumthor-las-termas-de-vals/>). Copyright.

des muros de piedra para evitar la entrada de agua. En el interior de los espacios estas aberturas producen sensaciones desconcertantes al contrastar la pesadez del hormigón en la cubierta y el paso de la luz que baña los muros monolíticos y creando la ilusión de ligereza y de suspensión de la losa por sobre los muros.

Estos nuevos sistemas rompen con la forma estructural común de apoyo directo de la losa con muros o columnas, generando una nueva perspectiva en la manera de concebir el espacio, que además suma en la composición arquitectónica, brindando un carácter diferente y especial al proyecto y a la arquitectura en sí, con un potencial infinito según sea la idea y el

concepto del cual parte el proyecto.

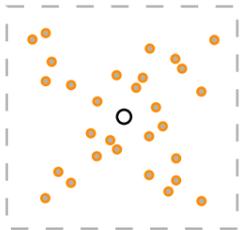
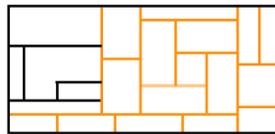
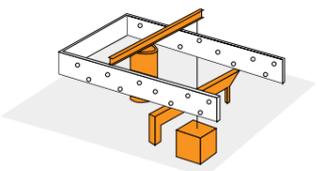
En la Casa de Burdeos diseñada por el arquitecto Rem Koolhaas se desplazan los elementos de apoyo en planta, la posición de las dos vigas hace que un extremo de la casa quede apoyado sobre una de las vigas y que el otro lado cuelgue de la viga que se encuentra sobre la cubierta, la cual necesita de contrapeso para la estabilidad de todo el sistema estructural. Es así como la casa, se encuentra apoyada y colgada al mismo tiempo, lo que produce desconcierto por parte del observador incapaz de identificar fácilmente los elementos estructurales, los cuales son los protagonistas del proyecto.

Nota. Adaptado de *Casa Lemoine en Burdeos, Rem Koolhaas*, por I. Beka y L. Lemoine, (<https://hyperbole.es/2018/06/casa-lemoine-en-burdeos-rem-koolhaas-1996-1998/>). Copyright.

Figura 77
Casa de Burdeos



Figura 78
Ejemplos de alteración y distorsiones de la estructura en la arquitectura

Distorsiones	Proyecto	Arquitecto	Imagen
	Crematorio Baumschulenweg	Shultes Frank Architekten	
	Termas de Vals	Peter Zumthor	
	Casa de Burdeos	Rem Koolhaas	

2.3. Estructuras optimizadoras

Las estructuras optimizadoras son aquellas que toman la forma ideal para la optimización de recursos materiales y son las que mejor responden a comportamientos resistentes, este tipo de estructuras comparadas con las estructuras tradicionales de pórticos “soportan las mismas cargas, salvando las mismas distancias con la menor cantidad de material y la misma seguridad” (Diez, 2005, p. 11).

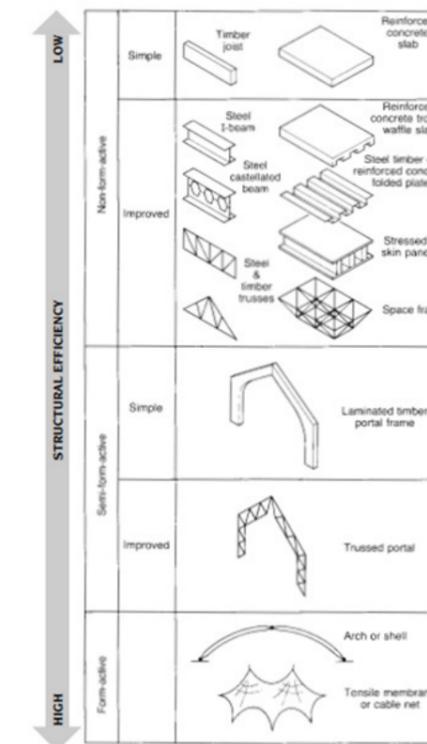
El diseño orientado a la optimización radica en la forma en que el rendimiento material se entiende e instrumentaliza para revertir el paradigma moderno de la revolución industrial, del material homogéneo, estático, inerte, estandarizado, y de composición uniforme, isotrópico, con propiedades idénticas o muy similares en todas sus direcciones, que ha condicionado al material en su uso pasivo, con tipologías y dis-

posiciones espaciales y estructurales predefinidas, ancladas a los paradigmas de la mecánica clásica. (Granda, Chiarella, & Veizado, 2017, p. 49)

El uso de estructuras optimizadoras en un proyecto arquitectónico implica que el diseño no se encuentre definido “por una forma concreta e invariable, sino por un concepto o un planteamiento más abierto; la forma deja de ser el inicio inalterable del proyecto para convertirse en el resultado de un proceso” (Bernabeu, 2007, p. 101).

Este modelo de estructuras se plantea como una estrategia de diseño arquitectónico ya que la concepción de la forma física del proyecto se puede proponer desde un enfoque de optimización estructural, que argumenta y justifica parte de la configuración formal del proyecto.

Figura 79
Clasificación de los elementos estructurales



Nota. Reproducido de *Clasificación de los elementos estructurales* (p. 46), por A. J. Macdonald, 2001, Copyright.

Se utilizan normalmente solo en circunstancias en las que existe un requisito especial para lograr un alto grado de eficiencia estructural, ya sea porque el tramo involucrado es muy grande o porque se requiere una estructura de peso excepcionalmente ligero. Tienen geometrías que son más complicadas que las de postes y vigas o tipos (...) y producen edificios que tienen formas distintivas. (Macdonald, 2001, p. 57).

Neri Oxman (2010), sugiere que en el diseño de las formas optimizadas trabajan tres grandes campos: la estructura, la materialidad y la geometría; estos campos son dependientes entre sí y configuran la forma final de la arquitectura, ejemplo de esto es la catenaria.

La catenaria es la geometría natural que adquiere una cadena cuando se sostiene por los dos extremos y cae por su propio peso; por

tanto, la geometría óptima para un arco que solo soporta su propio peso es la de una catenaria invertida, ya que todos los elementos que trabajan a tensión si se los invierte pasan a trabajar a compresión, este principio lo estudio Robert Hooke en el siglo XVII, mencionado que “del mismo modo que cuelga el hilo flexible, así pero invertido, se sostendrá el arco rígido” (Heyman, 1999).

La geometría de una catenaria es mucho más optima que la de un arco de medio punto porque necesita de menos material para la misma estabilidad.

Luego de algunos años fue Gaudí el primer arquitecto occidental en aplicar la forma de la catenaria en la arquitectura, Gaudí estudio muy bien esta forma geometría y experimento con maquetas estereotácticas ya que conocía perfectamente que toda estructura que traba-

ja a tensión si se voltea trabaja a compresión, por lo que el arquitecto confiado de esta geometría construyó catenarias en algunos de sus proyectos utilizando mampostería de ladrillo.

Antonio Gaudí dio un paso más allá y planteo la geometría óptima para un arco que además de aguantar su propio peso tiene que soportar más carga; esto sería como coger la misma cadena y por los dos extremos y distribuir uniformemente carga adicional a esta, entonces la forma que adquiere la catenaria va a ser la de una parábola.

Para el diseño de la capilla de la Colonia Güell, Gaudí realizo una maqueta invertida donde uso modelos colgantes de alambre donde colgó pequeños saquitos los cuales representaban el peso a soportarse, de esta manera se generaban todas las formas, definidas directamente de la respuesta estructural.

Las formas físicas que puede tomar un proyecto son múltiples dependiendo del diseño planteado por el arquitecto, pero a la hora de proyectar existen formas que son mucho más optimas que otras.

Si se compara una semi esfera frente a un semi cilindro, ambos de igual tamaño, de igual material y de igual masa, ¿Cuál es más resistente?

Para responder esta pregunta primero hay que comprender la geometría de ambas figuras, el semi cilindro este compuesto por líneas rectas y líneas curvas, lo que se denomina curvatura simple y la semi esfera se compone solo por líneas curvas en sus dos direcciones, lo que se denomina doble curvatura.

A pesar de las similitudes la semiesfera es mucho más resistente que el semi cilindro y

Figura 80
Catenaria y parábola en la arquitectura

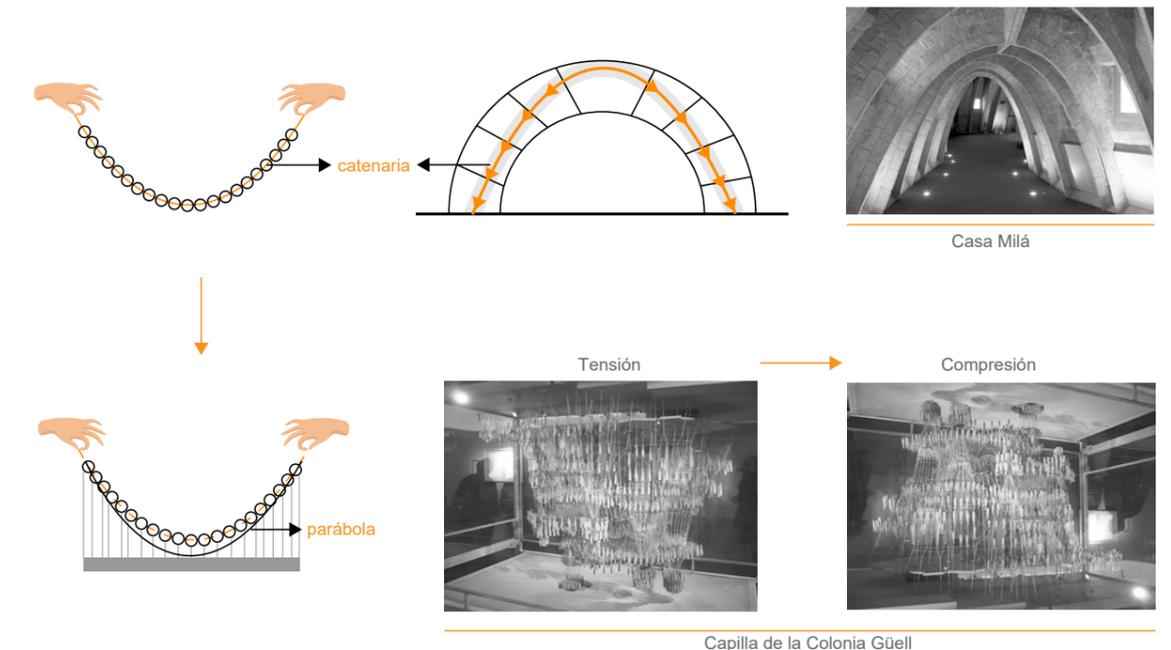
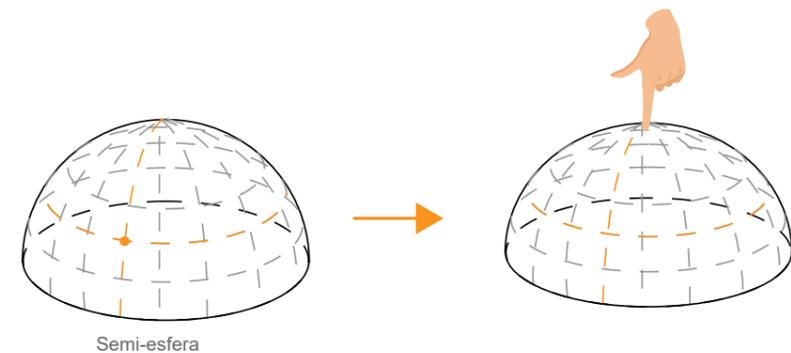


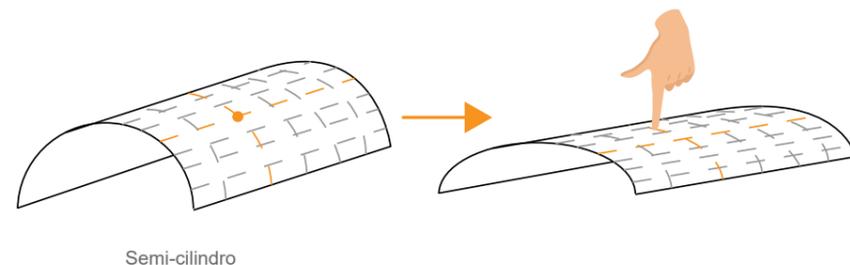
Figura 81
Tipos de curvatura

Doble curvatura



VS.

Curvatura simple



esto es por su geometría de doble curvatura, ya que en cada punto de la superficie se encuentran dos curvas que hacen a la estructura más resistente.

Las estructuras denominadas conchas o Shell en inglés tienen una geometría parabólica hiperbólica, es decir que son superficies de doble curvatura, donde las dos curvas que conforman la superficie son parábolas lo que las hace más resistentes.



El comportamiento estructural de las carcasas, en comparación con otro tipo de estructuras, se caracteriza por una mayor eficiencia mecánica (...) Si se realizan diseños adecuados, las

carcasas pueden soportar cargas elevadas y permitir cubrir espacios importantes con poco material y / o espesor. (Tomas & Marti, 2009, p. 1)

“Las estructuras de cascara logran la síntesis pura entre la forma arquitectónica y la estructural. También conocidas como estructuras lamiares, las cascara resisten y transmiten cargas con espesores mínimos”. (Charleson, 2007, pp 39-40)

Bajo esta geometría y trabajando con maquetas invertidas como lo hacía Gaudí, Heinz Isler experimento y desarrollo modelos de membranas y mallas colgantes para el diseño de las cáscaras de hormigón armado.

Nota. Adaptado de *Deitingen Sued Raststaette*, 2009, (https://es.wikipedia.org/wiki/Heinz_Isler#/media/Archivo:Deitingen_Sued_Raststaette,_Schalendach_01_09.jpg). CC BY-SA 3.0

Figura 82
Área de servicio de la autopista Deitingen sur, Heinz Isler



Figura 83
L'Oceanografic



Félix Candela es el impulsor de las shells y algunas de sus obras más famosas son el Oceanogràfic y la capilla Lomas de Cuernavaca.

También existen muchos otros ejemplos en arquitectura como el Hipódromo de la Zarzuela de Eduardo Torroja; a primera vista la cubierta del hipódromo parece estar compuesta por la unión de semi cilindros, pero si Torroja

Nota. Adaptado de *L'Oceanografic (Valencia, Spain)*, por F. Galbaldón, 2010, ([https://es.wikipedia.org/wiki/Oceanogr%C3%A0fic#/media/Archivo:L'Oceanografic_\(Valencia,_Spain\)_01.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Oceanogr%C3%A0fic#/media/Archivo:L'Oceanografic_(Valencia,_Spain)_01.jpg)). CC BY 2.0

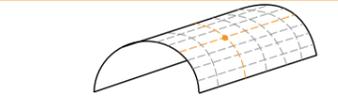
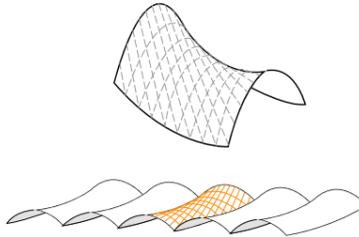
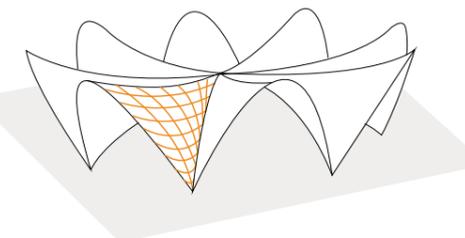
Figura 84
Hipódromo de la Zarzuela



hubiese utilizado la geometría de semicilindros para la conformación de su cubierta no hubiese sido posible esa forma, esa esbeltez ni tampoco esa resistencia, seguramente hubiese necesitado de más apoyos y la idea de ligereza transformaría totalmente el proyecto; la geometría que Torroja usó fue la mitad de un hiperboloide, que nuevamente gracias a la doble curvatura de esta geometría es posible que la cubierta sea tan fina y resistente.

Nota. Adaptado de *Hipódromo de la Zarzuela*, por X. Michavila, (<https://i.pinimg.com/originals/86/71/9f/86719ffec92591dba09702ec4437440c.jpg>). Copyright.

Figura 85
Ejemplos de estructuras optimizadoras en la arquitectura

Geometría	Proyecto	Arquitecto	Imagen
 <p>Semi-cilindro</p>	Hipódromo de la Zarzuela	Eduardo Torroja	
 <p>paraboloides hiperbólico</p>	Hipódromo de la Zarzuela	Eduardo Torroja	
 <p>paraboloides hiperbólico</p>	Oceanográfico	Félix Candela	

2.4. Envoltente estructural

Según el diccionario de la RAE la envolver significa: “cubrir un objeto parcial o totalmente, ciñéndolo de tela, papel u otra cosa análoga, o también rodear una cosa por todas sus partes”. Relacionado este concepto dentro de la arquitectura, la envoltente estructural es aquella que cubre o rodea el espacio.

La envoltente estructural determina la apariencia exterior de la edificación y es independiente del soporte estructural interno, es decir, es una subestructura que conforma la piel exterior del proyecto, muchas veces ajena a su configuración interna, por lo que la envoltente cuenta con su propia estructura haciéndola portante. La envoltente estructural configura la forma exterior del proyecto también entendida como fachada; comprendiendo a la forma como la configuración externa de la edificación; Arthur Erickson menciona:

La estructura es el elemento más fuerte y potente de la forma, hasta el punto de que, si no es el último en considerarse en la larga serie de decisiones que condicionan la forma, distorsiona o modifica todos los demás factores determinantes de un edificio. (Charlson, 2007, p. 37)

A lo largo de la historia de la arquitectura, la envoltente y la estructura se han relacionado y concebido de distintas formas. “En determinados periodos, la fachada no responde a requisitos formales y estructurales, sino únicamente a las necesidades comunicativas hacia su entorno externo. Identificación vs asociación de la envoltente respecto a la estructura portante se fueron alterando en el tiempo” (Fortea, 2015, p.29).

La envoltente no solo debe cumplir con requisitos estructurales sino también con requisitos

formales, compositivos, climáticos, de relación con el contexto, etc., pero al ser independiente de la configuración estructural interna del edificio, crea mayor libertad en el diseño exterior del proyecto. Las formas libres de la arquitectura contemporánea generan múltiples posibilidades para la forma física externa de un proyecto.

Figura 86
Comportamiento de los edificios en altura

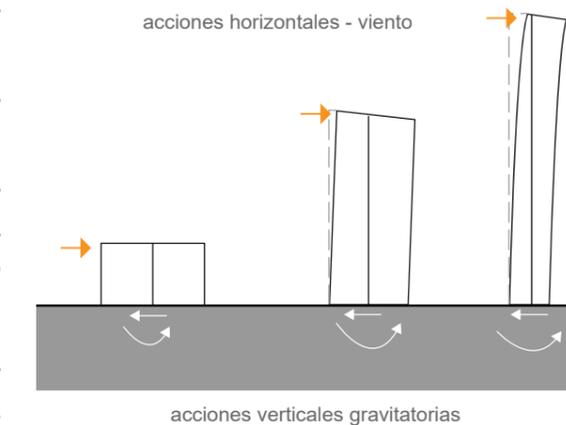
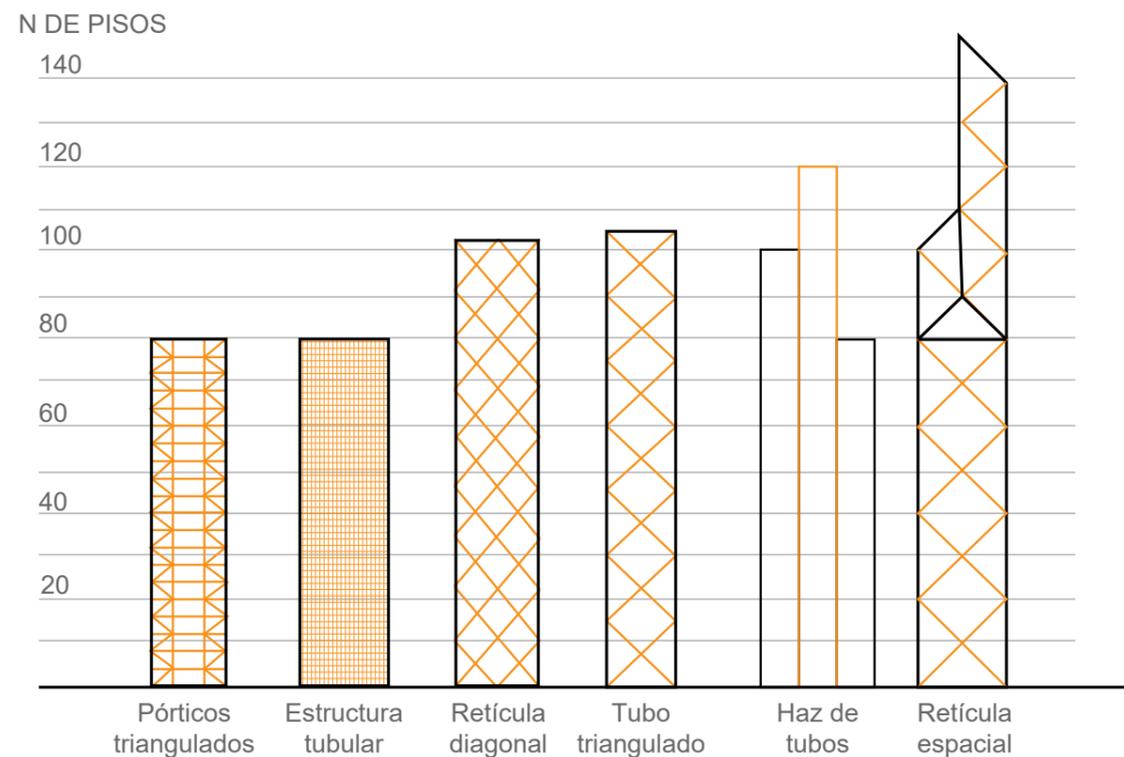


Figura 87
Envolventes estructurales para edificios en altura



2.4.1. Envolventes estructurales para edificios en altura

Los edificios en altura tienen que considerar varios factores constructivos importantes, “por un lado, la acción del viento hace necesaria un conjunto rígido, por otro lado, se requieren edificios de cierta flexibilidad y ligereza que resistan las acciones de los sismos” (Fortea, 2015, p. 79).

Los rascacielos utilizan esta envolvente debido a que requieren soportar las acciones verticales gravitatorias y las acciones horizontales provocadas por el viento y los sismos puesto que su altura es determinante en el proyecto.

Para ello se traslada la estructura portante destinada a soportar estos esfuerzos al perímetro exterior del edificio, conformando una macroestructura

de gran rigidez, que se comporta como un enorme tubo estructural empotrado en su base, formado por forjados y soportes perimetrales conectados entre sí rígidamente. (Bernabeu, 2007, p. 89)

En las edificaciones en altura la envolvente estructural es un punto clave para resistir cargas laterales, comúnmente esto se logra por medio de arriostramientos situados en el perímetro de la edificación; esta necesidad de la envolvente de resistir las fuerzas del viento y las distintas cargas gravitatorias han tenido repercusión directa sobre la estética y la fachadas, de esta manera las torres o rascacielos “han sido diseñados para comportarse como voladizos verticales únicos con la estructura concentrada en el exterior; en estos casos la expresión de la acción estructural es ineludible” (Macdonald, 2001, p.93).

De esta manera la envolvente estructural para este tipo de edificaciones puede adaptarse a configuraciones determinadas. Los tipos básicos de estructuras para edificios en altura según algunos autores son:

2.4.1.1. Pórticos triangulados

Las estructuras de pórticos triangulados consisten en cerchas verticales que resisten las cargas laterales.

Estas cerchas verticales utilizan los pilares perimetrales como cordones y diagonales en K, V o X como barras interiores, eliminando de forma eficaz la flexión debida a las cargas laterales en los pilares. Los pilares, las vigas y las barras diagonales pueden estar conectadas mediante articulaciones, haciendo su fabricación y montaje

más económico que si se requiriesen conexiones rígidas. La triangulación aumenta la rigidez de la estructura, modera el desplazamiento lateral y permite mayores alturas globales. (Ching F. D., 2009, p. 264)

2.4.1.2. Estructuras tubulares

Este tipo de estructuras utiliza todo el perímetro de la edificación para resistir las cargas laterales. Las estructuras tubulares se pueden entenderse como “una viga en forma de tubo que forma una ménsula empotrada en el terreno, con una malla exterior constituida por pilares muy próximos entre sí y unidos rígidamente con vigas de gran canto” (Ching F. D., 2009, p. 265).

Un ejemplo de este tipo de envolvente estructural fueron las Torres Gemelas en Nueva

Figura 88
Torre Hearst, Nueva York



York, para la envolvente del edificio se utilizó pilares separados por una distancia entre 1,2 y 4,6 m entre ejes, y vigas entre 61 y 122 cm de canto.

2.4.2.3. Estructuras de retícula diagonal (diagrid)

Goldsmith planteó la posibilidad de un desarrollo óptimo de la retícula estructural sustituyendo la geometría euclidiana de los modelos tradicionales por otra en la que el uso de diagonales permitiera una eficaz rigidización de los planos exteriores, acortando el recorrido de los esfuerzos hasta el terreno. (Fortea, 2015, p. 85)

La retícula diagonal resiste tanto las cargas laterales como gravitatorias de manera eficaz. “Los elementos diagonales del sistema

diagrid soportan cargas tanto gravitatorias como laterales, gracias a la triangulación que proporciona una distribución relativamente uniforme de los esfuerzos” (Ching F. D., 2009, p. 269). Las estructuras reticulares también pueden transferir las cargas a través de múltiples recorridos en caso de que se produzca un fallo localizado en la estructura. La Torre Hearst en New York, diseñada por Foster and Partners ejemplifica una edificación que hace uso de la retícula diagonal.

2.4.2.4. Estructuras de tubo triangulado

La envolvente estructural de tubos triangulados se rigidiza mediante la incorporación de grandes diagonales en el perímetro del edificio. “Las diagonales soportan las cargas laterales principalmente mediante esfuerzos axiales, al tiempo que actúan como pilares inclinados a la hora de transmitir car-

gas gravitatorias de los forjados, permitiendo que los pilares perimetrales puedan estar más espaciados” (Ching F. D., 2009, p. 266).

Ejemplo de este tipo de envolventes es la torre Hancock de Chicago, diseñado por el arquitecto Bruce Graham y el ingeniero estructural Fazlur Khan.

Esta rigidización de los entramados perimetrales elimina el problema del cortante diferido que sufren las estructuras tubulares convencionales.

2.4.2.5. Haz de tubos

Una estructura de haz de tubos consiste en un conjunto de tubos individuales que se unen para que funcionen en conjunto como un solo cuerpo. La unión de varios tubos aumenta en gran medida la rigidez y reduce el balanceo

de las plantas superiores.

El haz de tubos actúa como un solo tubo exterior, cruzado interiormente por pantallas que trabajan como diagonales, evitando el retraso del cortante y la acumulación de cargas en las esquinas (...) Se trata, por tanto, de una estructura celular de funcionamiento mecánico tridimensional que permite componer el volumen por procesos aditivos relativamente alternos. (Ábalos & Herreros, 2000, p.73)

La Torre Sears de Chicago, diseñado por SOM, está conformada por nueve tubos de entramado de acero que se agrupan estableciendo una configuración de diversas alturas, donde cada uno de los tubos puede resistir la carga de viento de forma individual, dos de los módulos alcanzan los 440m de altura, tres

Nota. Adaptado de *John Hancock Center*, por Flickr. (https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-55783/clasicos-de-arquitectura-john-hancock-center-bruce-grahan-som/1278502634-han-neorla2-750x1000?next_project=no), Copyright.

Figura 89
Torre Hancock Chicago



Figura 90
Banco de China en Hong Kong



terminan en la planta 90, dos en la planta 66 y otros dos en la 55. La disminución de la altura de los módulos reduce el balanceo provocado por el viento, ya que rompe el flujo del mismo.

2.4.2.6. Retícula espacial

La retícula espacial resiste tanto cargas verticales como laterales. “Una estructura de retícula espacial es una estructura tubular modificada sobre la idea de apilar prismas triangulados que contienen diagonales y conectan el entramado exterior con el interior” (Ching F. D., 2009, p. 267).

El edificio del Banco de China en Hong Kong, proyectado por I. M. Pei, consiste en prismas triangulares de diferentes alturas. La retícula espacial resiste las cargas laterales y transfiere casi todo el peso del edificio a los cuatro superpilares de las esquinas.

Nota. Adaptado de *Bank of China Tower, Hong Kong, China*, por P. Warchol, (<https://www.jmhdezdez.com/2012/05/bank-of-china-tower-hong-kong-drawings.html>), Copyright.

Figura 91
Ejemplos de envolventes estructurales para edificios en altura en la arquitectura

Retícula	Proyecto	Arquitecto	Imagen	
	Torres Gemelas	Yamasaki Emery Roth		Estructura tubular
	Torre Sears de Chicago	SOM		Haz de tubos
	Torre Hearst	Foster and Partners		Retícula diagonal
	Torre Hancock de Chicago	Bruce Graham		Tubo triangulado
	Banco de China en Hong Kong	I. M. Pei		Retícula espacial

2.4.2. Entramados como envolvente estructural

El entramado es una especie de armazón que recubre el perímetro de la edificación a manera de retícula, donde la estructura se entrecruza para conformar la envolvente del proyecto, siendo independiente de la estructura interna.

La envolvente estructural además de ser el soporte exterior del edificio, también ejerce un fuerte papel compositivo ya que, es la que define la configuración de la fachada en la apariencia externa de las caras del edificio a manera de piel que lo envuelve y que genera una relación compositiva con el contexto en cual se emplaza.

Este sistema estructural, a la vez compositivo y portante, permite concentrar en un mismo elemento diferentes funciones a la vez; las

funciones de resistencia, de rigidez y de estabilidad del edificio se unen a la función de cerramiento, de forma arquitectónica, de ornamento, incluso de acondicionamiento térmico.

El edificio para la tienda TOD'S, proyectado por Toyo Ito, resuelve la envolvente con un entramado estructural de hormigón cuya configuración representa el ramaje de árboles, el arquitecto se inspiró en la arboleda que recorre Omotesando en Tokio, donde se ubica este proyecto, trazando la envolvente como una representación de ramajes que se extienden hasta 7 pisos de altura, donde no existe estructura interna, en este proyecto todo el sistema estructural se localiza en el entramado de la envolvente portante.

El edificio para Prada, realizado por los arquitectos suizos Herzog y de Meuron, es otro ejemplo donde la envolvente consiste en un

tramado estructural, el contorno del edificio se resuelve mediante una malla de acero estructural, que otorga al proyecto la apariencia de un volumen tallado y abstracto respondiendo a los conceptos formales del proyecto. “El proyecto buscaba ser un hito que actuase como epicentro de Omotesando en Tokio. Se concibe como un elemento escultórico que con su vidrio facetado recuerda a las joyas: un edificio que es un sólido más tallado que construido” (Fortea, 2015, p. 212).

La envolvente estructural consiste en un entramado de rombos y la mezcla de paneles de vidrio cóncavos, planos y convexos. En esta edificación todos los elementos estructurales como el entramado, los núcleos verticales y los forjados están insertados unos con otros entre sí configurado la estructura del edificio al mismo tiempo.

Figura 92
Edificio para la tienda TOD'S



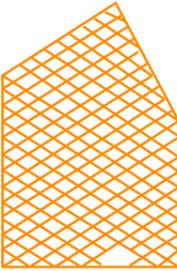
El pabellón de la Serpentine Gallery, en Londres consiste en una armazón portante que cubre el espacio con una estructura de vigas y pilares entrecruzados que se conjugan en una envolvente estructural únicamente para resolver todo el proyecto.

El entramado estructural consiste en un patrón geométrico donde “la piel estructural se define a partir de una serie de cuadrados que reducen su tamaño conforme giran, conservando su centro, y prolongan sus lados de manera que se crucen entre sí, extendiéndose por toda la cubierta y las fachadas” (Bernabeu, 2007, p. 108).

El exterior del proyecto se revistió con paneles de aluminio y vidrio mientras otros son huecos, conformando un entramado abstracto con motivos poligonales, donde la envolvente no se percibe como un elemento estructural.

Nota. Adaptado de *TOD'S Omotesando Building*, por Nacasa & Partners Inc., (https://diariodesign.com/wp-content/uploads/2013/03/toyo-ito_tods-01.jpg), Copyright.

Figura 93
Ejemplos de entramados como envolvente estructural en la arquitectura

Retículas regulares	Proyecto	Arquitecto	Imagen
	Tienda TOD'S	Toyo Ito	
	Edificio para PRADA	Herzog y de Meuron	
	Pabellón de la Serpentine Gallery	Toyo Ito	

Capítulo 03

Análisis comparativo entre el edificio 30 St Mary Axe y la Torre Agbar

3.1. Identificación y selección de los proyectos a analizar

Para la tercera y última parte de la investigación, se busca valorar el potencial de la estructura en la arquitectura mediante el contraste de dos obras arquitectónicas que se hayan construido en el mismo año o años cercanos, que mantengan el mismo programa arquitectónico y de similar apariencia en cuanto a forma y volumen, a fin de contrastar y establecer una serie de diferencias entre el papel y tratamiento que se le otorga a la estructura dentro del proyecto, que ayuden a comprender el potencial compositivo de la estructura en la arquitectura.

Para la identificación de los dos casos de estudio se toma como base todos los ejemplos mencionados por el Ingeniero Alejandro Bernabeu en Análisis y potencialidad de las es-

trategias de diseño estructural identificadas en la arquitectura contemporánea de la Tesis Doctoral “*Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea*”.

Son treinta y tres obras arquitectónicas construidas las que se mencionan en la Tesis, las cuales se encuentran divididas en cuatro, según las estrategias planteadas por Bernabeu, de estas treinta y tres obras se establece una relación según los años de construcción, para poder realizar un análisis mucho más crítico de los casos de estudio al ser coetáneos y de esta manera poder descartar algunas obras.

De los treinta y tres proyectos iniciales, veintisiete presentan similitud en el año de construcción; una vez agrupados los proyectos

según este punto, se realiza una nueva clasificación para establecer la relación de las obras ahora con el programa arquitectónico, lo que reduce los casos de estudios a dos grupos dentro de las estructuras contenedoras.

En el programa de oficinas construidas entre el 2004 y 2006, se encuentran la Torre Agbar y el edificio 30 St Mary Axe y según el programa arquitectónico de comercio, se encuentra el edificio de Parada y el de Toods.

Para definir las obras a contrastar, el último parámetro a cumplir es que los proyectos tengan formas similares en cuanto a volumen o figura, seleccionando la Torre Agbar y el 30 St Mary Axe, como los dos casos de estudio a contrastar por su gran similitud.

Figura 94
Listado de obras arquitectónicas

ESTRUCTURAS ALTERADAS

01. Staatsgalerie
02. Fundación Meni
03. Intercambiador TGV/RER en París
04. Casa de Burdeos
05. Centro de las Artes de la Coruña
06. Kunsthal de Rotterdam
07. Proyecto del Congrexpo
08. Crematorio Baumschulenweg
09. Casa de la Música, Oporto
10. Pabellón de la Serpentine Gallery
11. Pabellón de Portugal Expo
12. Forest Park

ESTRUCTURAS OPTIMIZADAS

13. Cubierta del British Museum
14. Torre CCTV
15. Dutch House
16. Casa Varsavsky

ESTRUCTURAS CONTENEDORAS

17. Edificio Prada en Tokio
18. Biblioteca de Seattle
19. Torre Agbar
20. Serpentine Gallery
21. Casa de la Música en Oporto
22. Centro Pompidou de Metz
23. Gran Museo Egipcio
24. Torre CCTV
25. Torre Swiss-Re
26. Torre Turning Torso
27. Edificio Tod's
28. Estadio olímpico de Pekín
29. Forest Park

ESTRUCTURAS ALGORÍTMICAS

30. Federation Square
31. Serpentine Gallery
32. Parque de la relajación, Torrevieja
33. Intercambiador de Arnhem

Nota. Las obras se seleccionaron a partir de Análisis y potencialidad de las estrategias de diseño estructural de la arquitectura contemporánea de la Tesis Doctoral Estrategias de diseño estructural de la arquitectura contemporánea de Alejandro Bernabeu

Figura 95
Clasificación 1 según el año del proyecto

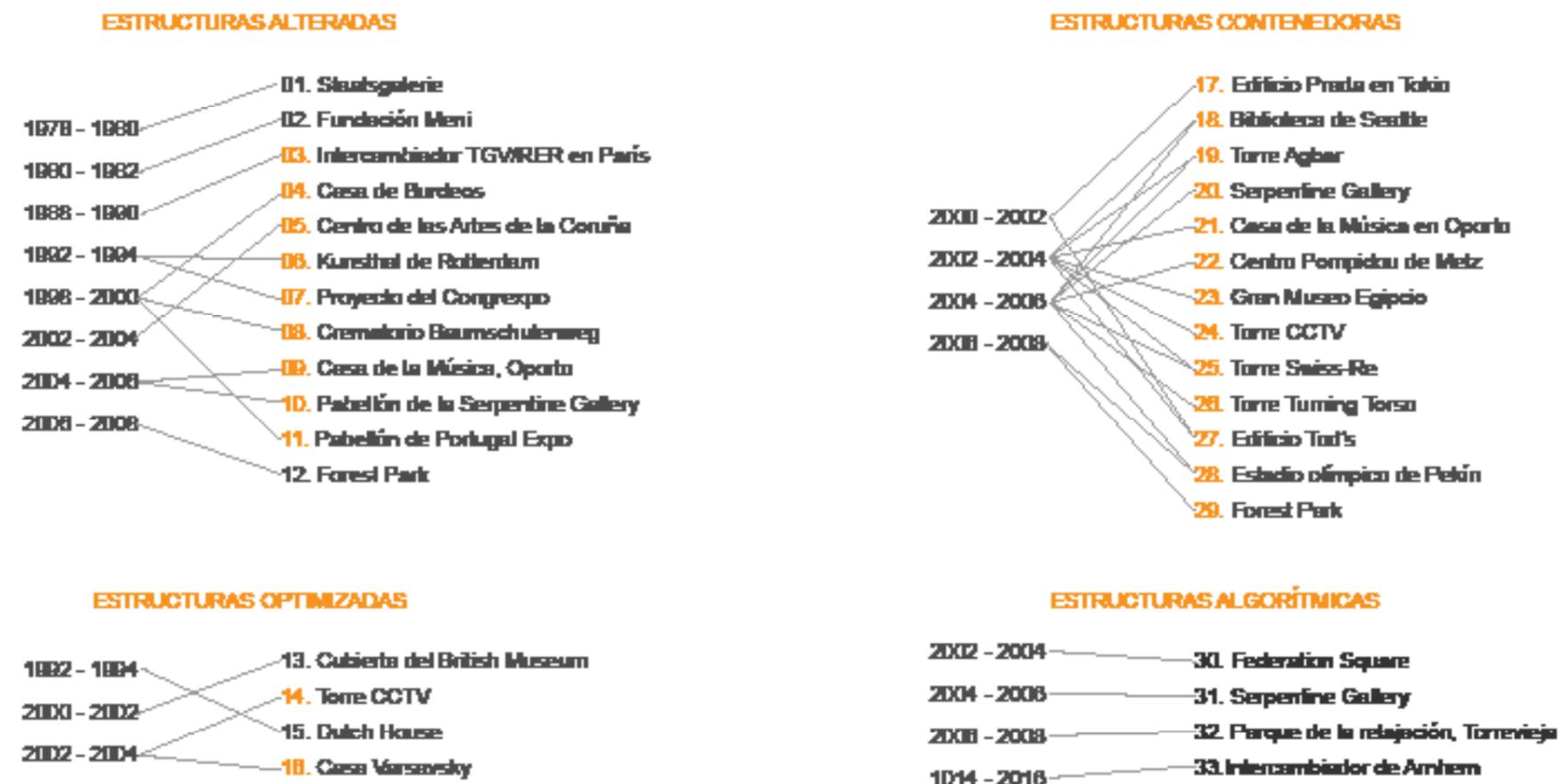


Figura 96
Clasificación 2 según el programa del proyecto

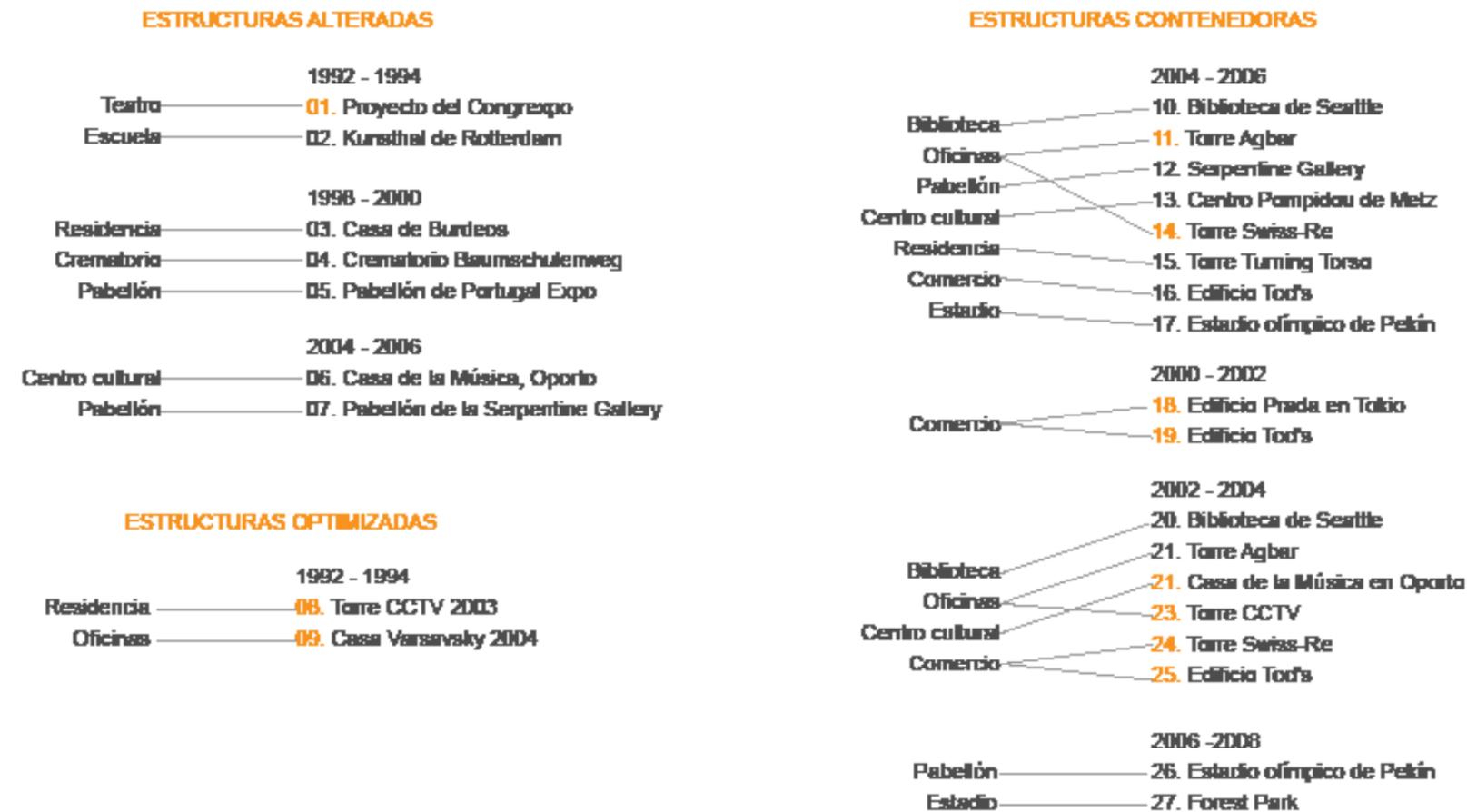


Figura 97
Clasificación 3 según el volumen y la figura del proyecto

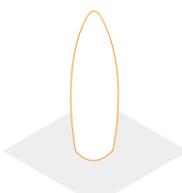
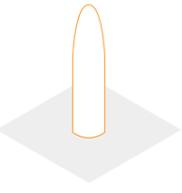
Imagen	Figura	Volumetría	Proyecto	Programa	Año
			1. Torre Swiss-Re	Oficinas	2004
			2. Torre Agbar	Oficinas	2004
			3. Edificio Prada	Comercio	2000
			4. Edificio Tod's	Comercio	2002

Figura 98
Generalidades de los proyectos seleccionados

Datos generales		Datos generales	
Nombre	30 St Mary Axe	Nombre	Torre Glòries
Tipo de estructura	Edificio	Tipo de estructura	Edificio
País	Reino Unido	País	España
Ciudad	Londres	Ciudad	Barcelona
Función de construcción	Oficina	Función de construcción	Oficina
Material estructural	Acero	Material estructural	Compuesto
Inicio de construcción	2000	Inicio de construcción	2001
Terminación	2004	Terminación	2004
Arquitecto		Arquitecto	
• Diseño	Foster + Partners	• Diseño	Ateliers Jean Nouvel
Ingeniero estructural		Ingeniero estructural	
• Diseño	Arup	• Diseño	Fermín Vázquez
• Revisión por pares	Ingeniería BuroHappold	• Diseño	Grupo Consultivo de BAC Robert Brufau y Asociados

Figura 99
Puntos para el análisis de los edificios



Para el análisis de los edificios se abordarán los puntos detallados en la figura 99, siempre desde un enfoque estructural en términos de composición arquitectónica, para finalizar con un cuadro comparativo entre el edificio 30 St Mary Axe y la Torre Agbar contrastando cada uno de estos puntos para su puesta en valor.

3.2. Análisis del edificio 30 St Mary Axe

3.2.1. Contexto y emplazamiento

El edificio 30 St Mary Axe se ubica al sureste de Reino Unido, Inglaterra en la ciudad de Londres, en el número 30 de la calle St Mary Axe, de ahí su nombre, en el antiguo emplazamiento de la sede del Baltic Exchange, una empresa internacional reconocida en la economía mercantil global dedicada al intercambio y servicio marítimo, que desde mediados del siglo XVIII es parte del sector financiero de la ciudad.

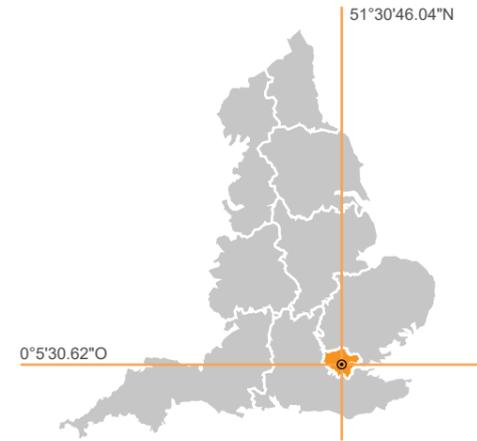
Figura 100
Ubicación del edificio 30 St Mary Axe



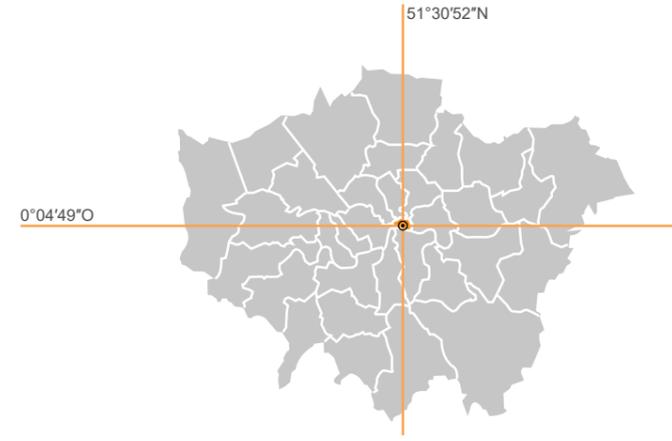
Ubicación de Inglaterra, Reino Unido, situación mundial.



Ubicación de Londres, Inglaterra, situación Reino Unido.



Ubicación de la City de Londres, Londres, situación Inglaterra.



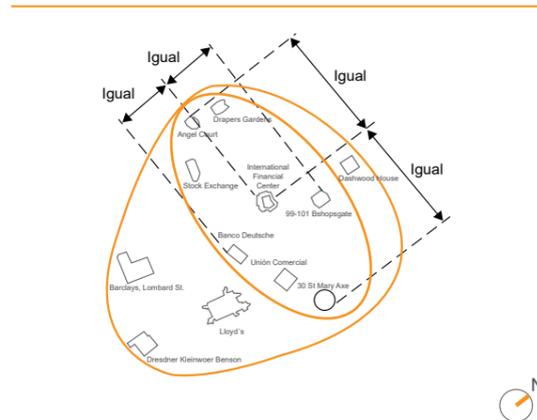
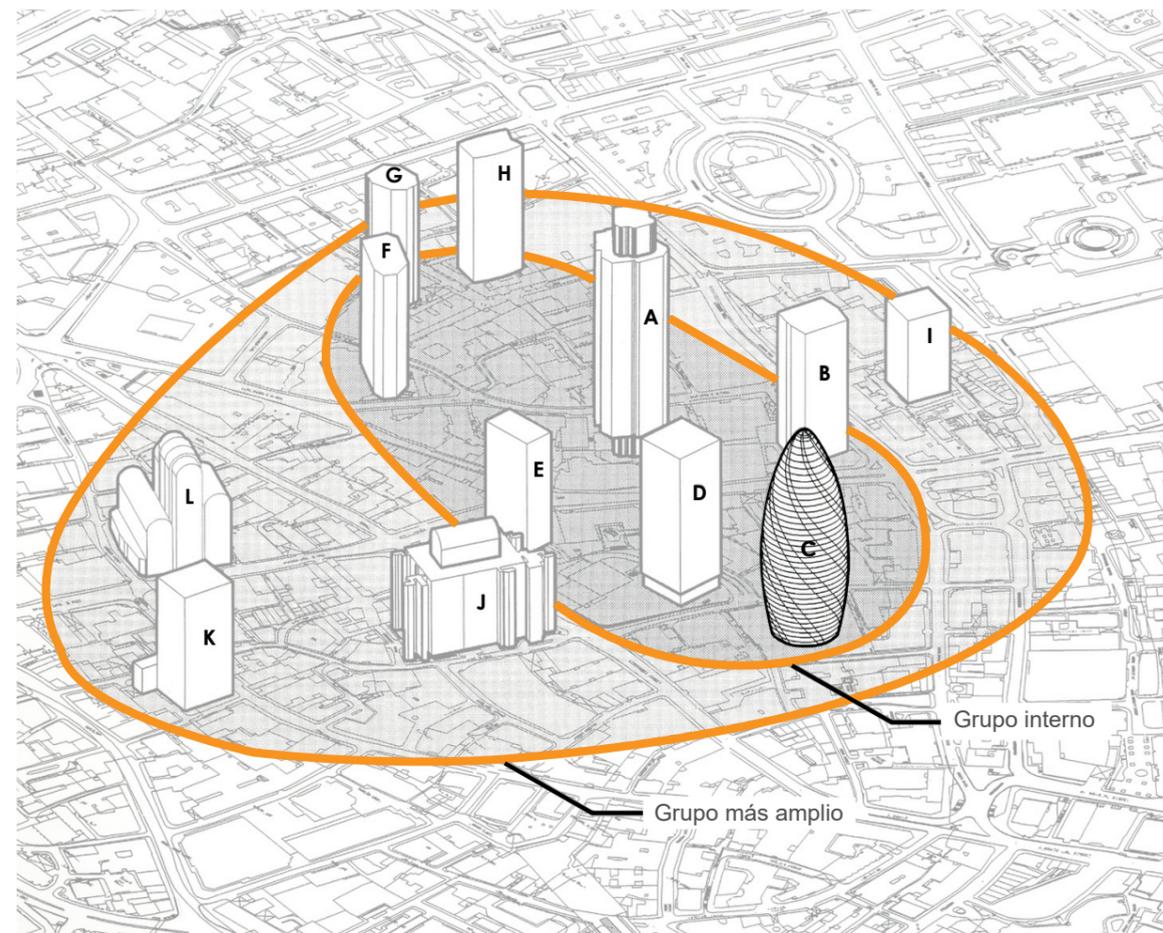
Ubicación de 30 St Mary Axe, City de Londres, situación Londres.



30 St Mary Axe



Figura 101
Consolidación del Clúster de edificios altos de la Ciudad de Londres



- A International Financial C. - 183m
- B 99 - 101 Bshopsgate - 105m
- C 30 St Mary Axe - 154m
- D Unión Comercial - 118m
- E Banco Deutsche - 88m
- F Stock Exchange - 99m
- G Angel Court - 93m
- H Drapers Gardens - 99m
- I Dashwood House - 66m
- J Lloyd's - 84m
- K Dresdner Kleinwoer Benson - 80m
- L Barclays, Lombard St. - 86m



El edificio, también conocido como la torre Swiss Re se localiza en el corazón financiero de Londres, en un área privilegiada por las ventajas del lugar.

Esta es una zona de gran importancia en la ciudad debido a la presencia de grandes empresas y a la arquitectura de edificios en altura como: la Torre 42, el rascacielos del 99 Bishopsgate, o el Edificio Lloyd's. La construcción del 30 St Mary Axe sugirió que la edificación mejoraría la visual horizontal en el cuadrante noreste de Londres, en la Consolidación del Clúster de Edificios Altos de la Ciudad.

Baltic Exchange fue un edificio protegido que se construyó en 1903, diseñado por Smith & Wimble, bajo un estilo de arquitectura neoclásica; el edificio permaneció en pie por 89 años hasta que sufrió graves daños el 10 de

abril de 1992 debido al atentado de IRA (Irish Republican Army) donde detonó una bomba dentro de una camioneta estacionada en 28 St Mary Axe; este fue el primero de los dos ataques que sufrió la ciudad por el mismo grupo terrorista.

Efecto de tales eventos el sitio adquiere un significado histórico, emocional y cultural para la ciudad, lo cual precisa de especial consideración, por lo que la English Heritage (Consejo gubernamental de protección del patrimonio histórico), el gobierno de la ciudad y la corporación de Londres estableció que, de realizarse una reconstrucción, esta tendría que mantener la fachada original del antiguo edificio hacia St. Mary Axe.

En 1994 la compañía Trafalgar House compró el predio donde se encontraba el Baltic Exchange. La empresa de múltiples industrias

Trafalgar House buscó mantener y respetar la imagen del antiguo edificio, contratando al estudio de arquitectura GMW para el diseño de un nuevo edificio. En 1996 la empresa Kvarner adquirió Trafalgar House y replanteó un nuevo diseño de un rascacielos diseñado ahora por Foster + Partners.

La construcción de un rascacielos en St. Mary Axe suponía un fuerte riesgo de bloquear el cuadro de visión hacia la cúpula de la Catedral de San Pablo que regulaba el desarrollo basado en una red de vistas protegidas según el plan visual de la gestión horizontal de Londres (Tavernor & Gunter Gassner, 2010).

La negociación entre las diversas partes del proceso de desarrollo, desafió a la Corporación de la Ciudad a equilibrar el riesgo de romper el régimen espacial orientado a la conservación

Figura 102
Vistas protegidas de Londres



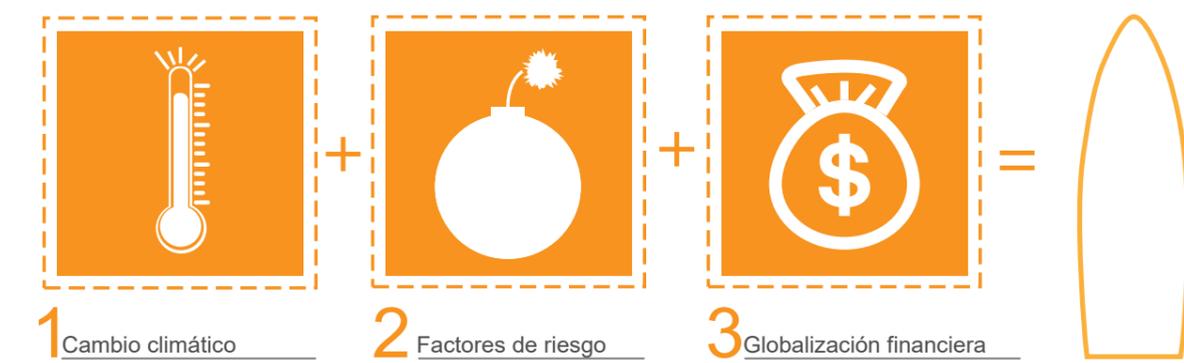
que había mantenido desde principios de la década de 1980, con el riesgo de perder supremacía como ubicación de servicios financieros frente a ubicaciones competidoras (...) Esta postura estableció un componente en el marco retórico dentro del cual la Ciudad finalmente cambió el régimen que regulaba su forma arquitectónica y urbana. (Massey, 2013)

Swiss Re fue quien acordó la compra del solar a Kvaerner y contrato nuevamente a Foster + Partners para el diseño de la sede de sus oficinas en Londres, para consolidar su fuerza laboral en un solo edificio en altura; para esto los arquitectos reformularon el diseño del edificio a una torre de 100 metros de altura, desde el año 1998 al año 2000, hasta llegar al diseño final de 180 metros de altura que fue aprobado por la Corporación de Londres con el apoyo de la organización English Heritage y

el alcalde de la ciudad Ken Livingstone y el 23 de agosto del mismo año se concedió el permiso para la construcción del nuevo edificio por parte del Viceprimer Ministro como Secretario de Medio Ambiente.

La concesión del consentimiento de planificación para 30 St Mary Axe no solo reflejó un cambio en la política con respecto a este sitio en particular, también inició un nuevo régimen de regulación espacial que rige el desarrollo de la ciudad. Codificado dos años después en un nuevo Plan de Desarrollo Unitario, este régimen dio la bienvenida a torres de gran altura dentro de “grupos” que diferían en cierto grado a los corredores de vista alrededor de la Catedral de San Pablo, siempre que los nuevos edificios brindaran servicios públicos y ejemplificaran un diseño de calidad. (Massey, 2013)

Figura 103
Ideas conceptuales del proyecto 30 St Mary Axe



3.2.2. Ideas conceptuales

Cambio climático

El cambio climático es una de las premisas iniciales que Foster + Partners tuvieron que tomar en cuenta para el desarrollo del nuevo edificio 30 St Mary Axe, ya que fue parte integral de la identidad de la marca del cliente. La empresa Swiss Re es una de las reaseguradoras más importantes del mundo, la cual gestiona los riesgos donde las catástrofes naturales son de las causas principal de las pérdidas aseguradas; por tal motivo la compañía se interesa en las actividades económicas que genera el impacto del tiempo y el clima, resaltando la sostenibilidad en sus políticas corporativas, así lo afirmó Sara Fox, directora de proyectos contratada por Swiss Re para dirigir la construcción de 30 St Mary Axe:

Para nosotros, la sostenibilidad tiene un excelente sentido comercial, porque pagamos reclamaciones en nombre de los clientes por inundaciones, olas de calor, sequías. En la medida en que estas afirmaciones estén relacionadas con el calentamiento climático global, es prudente de nuestra parte contribuir lo menos posible. (Russell, 2004)

Al tematizar sus sistemas de control ambiental y las características de consumo de energía, la nueva sede de Swiss Re en el Reino Unido destacó de inmediato el riesgo climático y demostró el compromiso de la compañía de gestionar ese riesgo a través de prácticas de sostenibilidad, interpretadas como una estrategia para gestionar el riesgo empresarial que plantea el cambio climático.

No solo la compañía Swiss Re buscaba de-

mostrar su compromiso con la gestión de la crisis climática con la construcción del nuevo edificio, sino que también Foster maneja esta filosofía en sus proyectos, como lo expresó en su intervención en la Celebración del Parlamento Británico el 29 de enero de 2003 “Los edificios consumen la mitad de la energía producida en una sociedad industrializada; transporte e industria, la infraestructura, el resto. Dado el vínculo entre la producción de energía, la contaminación y el calentamiento global, la amenaza para el frágil ecosistema del planeta, existen sólidos argumentos para reducir la demanda de energía en la construcción y la infraestructura. La búsqueda de un diseño más ecológico y ecológicamente responsable no se trata de moda, sino de supervivencia”

Foster + Partners (2013) también expresó que “Conceptualmente, la torre desarrolla ideas

exploradas en el Commerzbank y antes en Climatoffice, un proyecto teórico con Buckminster Fuller que sugirió una nueva relación entre la naturaleza y el lugar de trabajo”. Estos diseños fueron un antecedente en la búsqueda de regular el desempeño climático de un edificio mediante sistemas de control ambiental.

Factores de Riesgo

Debido a los diversos atentados que se han dado en Reino Unido por parte del grupo terrorista IRA, en la década de los 90 las empresas que brindan servicios financieros han adaptado técnicas para el control del área de oficinas a fin de proteger a sus trabajadores. El 30 St Mary Axe está ubicado dentro del conocido “Anillo de acero”, el cual consiste en un perímetro de seguridad en la City de Londres para controlar el acceso, establecer puntos de

control, monitoreo de tráfico, etc. con el propósito de cumplir con una intensa vigilancia en el centro donde se desarrollan los servicios financieros de la ciudad.

El nuevo edificio debía estar preparado y adelantarse a controlar cualquier ataque terrorista, teniendo en cuenta los actos antecedentes que se desarrollaron en el área y más específicamente en el lugar donde se encontraba el Baltic Exchange.

La seguridad es una de las principales características que debía cumplir el edificio, el diseño no solo está determinado por las políticas de la ciudad, sino también por el perfil del cliente y del lugar.

Dado que el negocio de la compañía es el reaseguro contra riesgos, incluidos los de terrorismo, la exposición

que compró el 30 St Mary Axe no solo era un pasivo, también era un activo. Al resaltar el compromiso de la compañía de gestionar los riesgos de terrorismo a través de una planificación, diseño y políticas prudentes, un nuevo edificio distintivo en un sitio con carga simbólica como este creó valor para la reaseguradora a medida que expandía su actividad en el mercado del Reino Unido. (Massey, 2013)

Globalización Financiera

La ciudad de Londres maneja ciertos códigos de zonificación para regularizar el desarrollo de la propiedad, los cuales consisten en revisar cada caso, donde los planificadores estiman que tan viable es la propuesta de una nueva construcción en la ciudad.

Para construir el edificio de Swiss Re se necesitó conseguir la aprobación del organismo de planificación que rige la ciudad (City Corporation), en este proceso intervinieron además los tribunales, la prensa y el mercado.

El nuevo edificio negoció un cambio en la política de la ciudad mediante la Corporación de la ciudad “parte de esa negociación implicó imaginar y poner en escena el riesgo: riesgo climático y riesgo de terrorismo, pero especialmente los riesgos financieros asociados con la globalización” (Massey, 2013).

Desde 1981 con la finalización de la Torre 42 diseñada por Richard Seifert, ubicada al oeste del 30 St Mary Axe, el cual era el edificio más alto de Reino Unido para aquel entonces con 47 pisos; la ciudad impidió la construcción de nuevos rascacielos y no fue hasta 1995 que Trafalgar House después de adquirir el sitio

para el 30 St Mary Axe consiguió el permiso para la construcción de un nuevo edificio en altura.

Esta nueva reformulación en la regulación del régimen de la forma arquitectónica y urbana de la ciudad posibilitó que los inversores y desarrolladores tanto locales como multinacionales capitalizaran el incremento en el valor de las propiedades de la City de Londres, convirtiéndose en uno de los centros más importantes de finanzas, banca y seguros en el mundo.

El desarrollo de The Gherkin estableció un nuevo grupo de torres de oficinas de gran altura de marca que expandieron la actividad económica en el distrito financiero de Londres al cambiar su carácter físico y urbano. Su planificación y diseño proporcionaron un

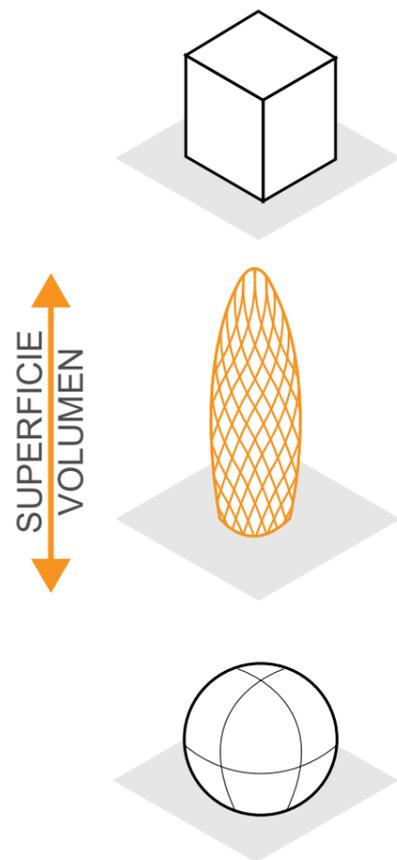
marco para las revisiones de las regulaciones de planificación que favorecieron los intereses de los propietarios de tierras, desarrolladores y empresas multinacionales de servicios financieros sobre los de los conservacionistas del patrimonio. (Massey, 2013)

3.2.3. Forma y volumen

La forma aerodinámica del 30 St Mary Axe, “es generada por un plan circular, con una geometría radial, en donde el edificio se ensancha de perfil a medida que se eleva y se estrecha hacia su vértice” (Foster + Partners, 2013).

Esta forma peculiar del edificio está fuertemente influenciada por el entorno físico de la ciudad y se concibe a partir de dos premisas: las condiciones ambientales y las limitaciones del sitio.

Figura 104
Volumetría del edificio 30 St Mary Axe



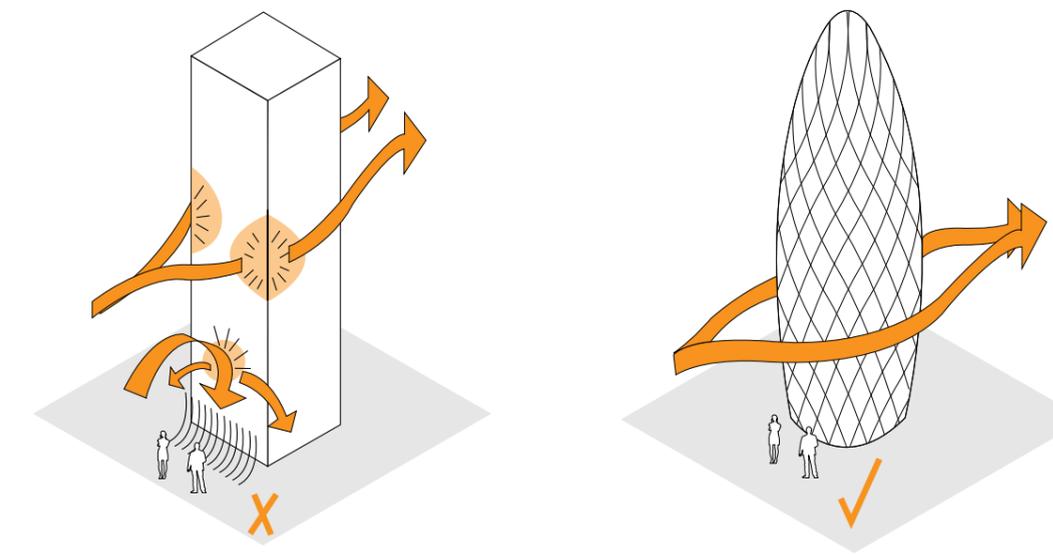
Condiciones ambientales

Uno de los problemas más importantes con los edificios en altura a considerar son las corrientes de aire que impactan al edificio, por lo que la forma casi cilíndrica del 30 St Maey Axe reduce las deflexiones, debido a que el viento choca sobre una superficie curva en vez de una superficie recta, lo que hace que el impacto sea mucho menor y suavice el flujo de aire alrededor de todo el edificio. Otro punto importante son los torbellinos que se crean en la base de los edificios en altura por las corrientes de aire, generando lugares incómodos a nivel de la calle.

Para abordar este problema se utilizaron modelos informáticos que, basados en las matemáticas de la turbulencia, simulan las propiedades aerodinámicas de un edificio. El modelo mostró que una forma cilíndrica res-

ponde mejor a las corrientes de aire que una cuadrada reduciendo los torbellinos. El hecho de que la torre sobresalga en el medio, alcanzando su diámetro máximo en el piso 16, también ayuda a minimizar los vientos en su base más delgada. (Freiberger, 2007)

Figura 105
Influencia del viento en la volumetría del edificio 30 St Mary Axe



abulta en el centro con un diámetro de 56.6m en su parte más ancha y se estrecha en su parte superior con un diámetro de 26.5m en el último piso; la forma no se basa en concepciones arbitrarias, caprichosas o en parámetros estéticos, sino que también responden a criterios específicos.

Limitaciones del sitio

Por la forma inusual del edificio, la planta circular al ser más estrecha en su base, libera la zona y genera espacio público a manera de plaza, la cual busca reducir el impacto a nivel peatonal maximizando el espacio público a nivel de calle por la densificación de la City de Londres; su superficie convexa hace que el tamaño imponente del edificio no se perciba completamente desde la calle.

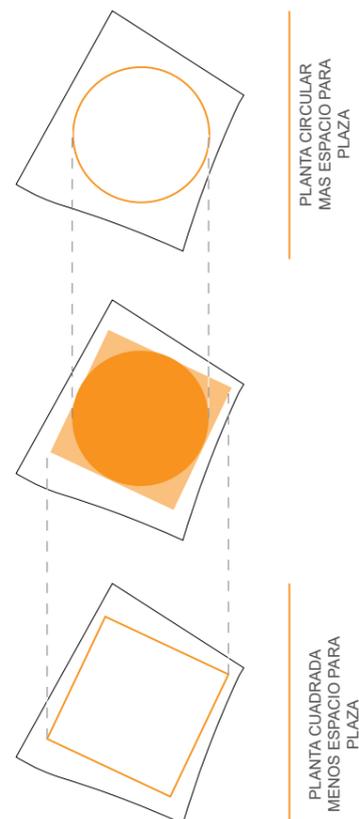
Al alejarse de sus líneas de propiedad

irregulares, la torre logra una autonomía formal casi perfecta de su contexto. La brecha entre la base de la torre circular y los límites trapezoidales del sitio forma un espacio público de propiedad privada, un equipamiento cívico y comercial en esta densamente parte construida de la Ciudad. (Massey, 2013)

Figura 106
Emplazamiento del edificio 30 St Mary Axe



Figura 107
Limitaciones del sitio, edificio 30 St Mary Axe



3.2.4. Diseño

3.2.4.1. Estrategias

Las estrategias de diseño aplicadas para el proyecto 30 St Mary Axe son muchas y se empiezan a generar en base a las ideas conceptuales iniciales, entrelazando distintos planteamientos formales para conformar un todo que resulte en un diseño congruente con el contexto, el cliente y el programa.

El cambio climático fue una de las ideas conceptuales principales en el proyecto, por lo que se buscó desde un inicio que el edificio 30 St Mary Axe sea lo más sostenible posible; y si se piensa en sostenibilidad, dos son los factores determinantes: la ventilación y la iluminación. Se debía maximizar la ventilación natural para poder ahorrar y disminuir considerablemente el uso de aire acondicionado

y además se debía aprovechar la luz natural para reducir el consumo de electricidad generado por la calefacción y las luminarias.

Para dar solución a estas consideraciones la estrategia fue diseñar seis pozos de luz mediante la sustracción de cuñas en forma triangular del plano circular de cada piso, los cuales se desfasan cinco grados de un piso a otro, desde planta baja hasta el nivel más alto; este giro crea balcones en cada nivel generando conexiones visuales entre las plantas, y abre vistas dentro y fuera del edificio; pero lo más importante es que forman una espiral que permite el ingreso de luz natural hacia todas las plantas y que el aire circule a través de estos espacios, los cuales “funcionan como los ‘pulmones’ del edificio, distribuyendo el aire fresco aspirado a través de paneles de apertura en la fachada” (Foster + Partners, 2013).

Figura 108
Diseño de forjados del edificio 30 St Mary Axe

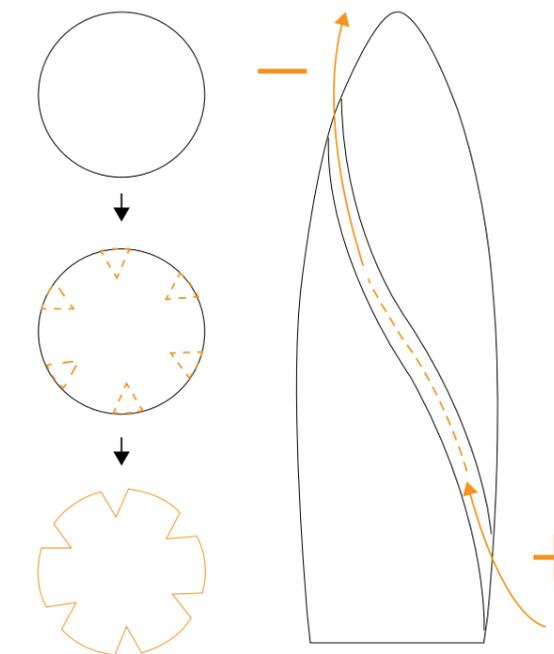
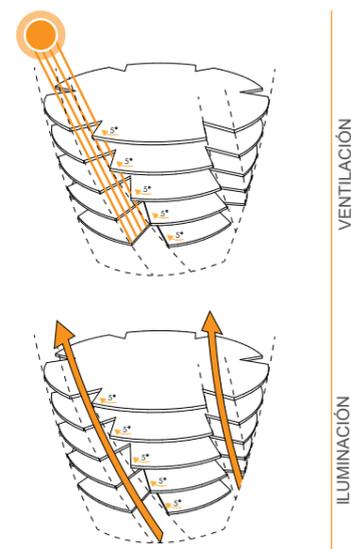


Figura 109
Pozos en las plantas del edificio 30 St Mary Axe



El 30 St Mary Axe fue diseñado para “respirar”, los huecos en cada nivel crean una ventilación natural, al hacer circular el aire a lo largo de 6 pisos, ya que cada sexto piso, esta circulación se interrumpe con cortafuegos.

Figura 110
Iluminación y ventilación gracias a los forjados, edificio 30 St Mary Axe



Nota. Adaptado de *Torre 30 St Mary Axe, Londres*, por N. Young - Foster + Partners, (<https://arquitecturaviva.com/obras/torre-30-st-mary-axe#lg=1&slide=11>), Copyright.

Además, en las zonas de la fachada de doble piel revestidas por acristalamiento transparente, hace que el aire entre las capas de la fachada externa e interna, absorban el calor solar, se eleven produciendo un efecto chimenea y se ventile hacia el exterior mediante pequeñas rendijas en la parte superior de cada bahía estructural de dos pisos.

Figura 111
ventilación en planta, edificio 30 St Mary Axe

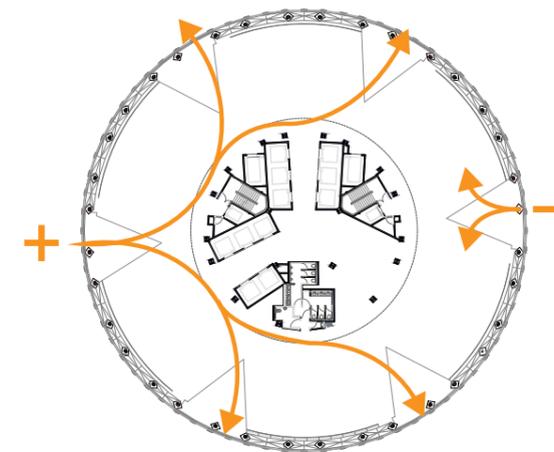


Figura 112
Iluminación y ventilación natural en fachada, edificio 30 St Mary Axe

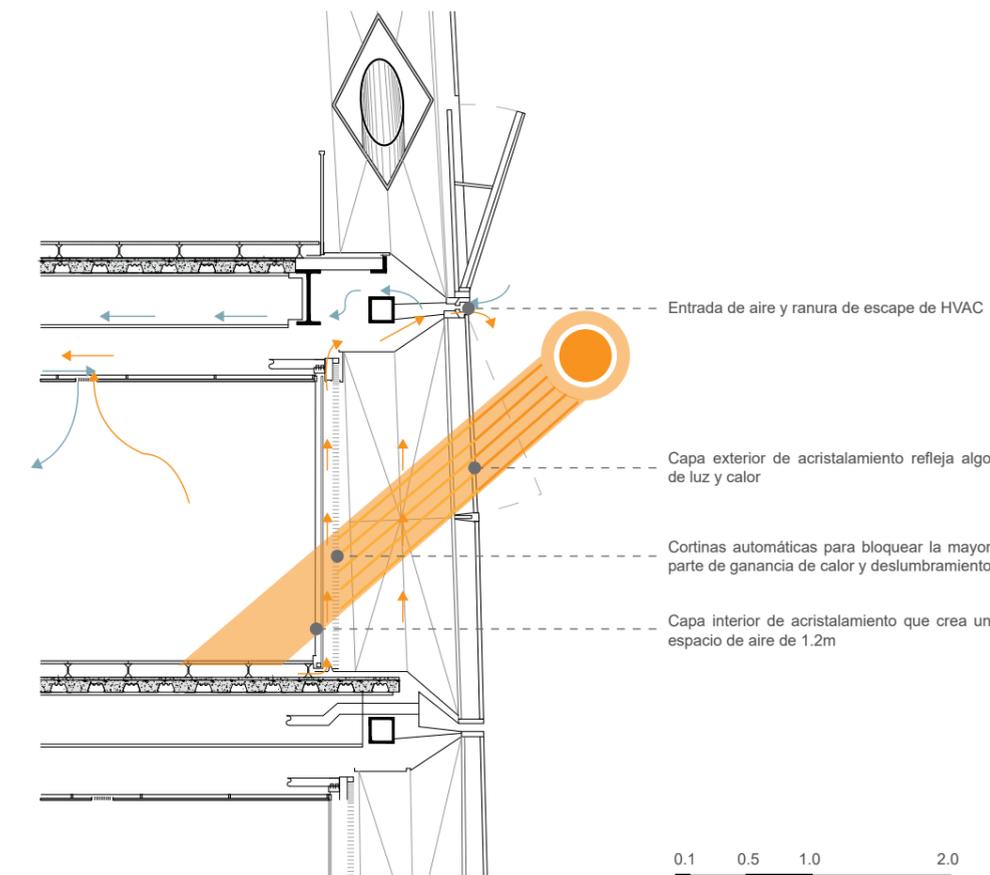
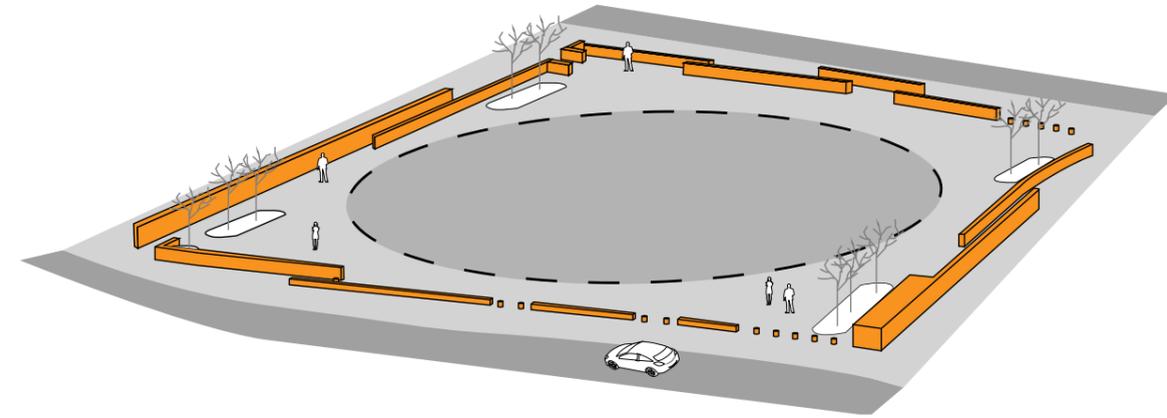


Figura 113
Diseño de la plaza del edificio 30 St Mary Axe



Todo esto permite que el edificio funcione sin luz artificial y sin aire acondicionado en ciertas horas y en ciertas épocas del año, reduciendo el consumo de energía de hasta el 50% en comparación con torres similares de oficinas, al cual Foster + Parnerts lo denominó como “el primer edificio alto ecológico de Londres”.

Para cubrir otra de las ideas conceptuales del proyecto la cual tiene que ver con la seguridad del edificio, se pensó en la plaza como un punto muerto, para mantener una distancia que ayude a mitigar el impacto que pudiera llegar a provocar una explosión de bomba en el lugar. La plaza también debe formar un perímetro para proteger al edificio de automóviles o camiones y esto se lo logra mediante el diseño de muros bajos, jardinerías y bolardos.

Otro perímetro de seguridad lo proporciona el sistema estructural del edificio. La estabilidad lateral de la cuadrícula perimetral proporciona una resistencia superior a las explosiones, así como redundancia estructural en caso de que una bomba o un vehículo golpee parte de la jaula de acero. (Massey, 2013)

Además, la forma de doble curvatura que mantiene el edificio no solo es eficaz para la desviación del viento, sino que también los consultores que manejaron el proyecto se dieron cuenta que esta forma puede disminuir notablemente el impacto de la energía provocada por una bomba en caso de darse una explosión cerca del sitio.

3.2.4.2. Estructura del espacio

La planta baja del 30 St Mary Axe se divide en tres zonas: zona de ingreso, zona comercial y la zona de servicio, la distribución de los espacios y las zonas se establece a partir de la estructura, al tener un núcleo central las columnas internas se disponen de forma circular siguiendo la geometría perimetral del edificio, lo que genera don aros espaciales en planta y es a partir de aquí que se establece la zonificación de los espacios, destinando el área de servicio en todo el núcleo central y el resto de zonas en el anillo siguiente.

Lo mismo sucede en los pisos superiores la zona de servicio la ocupa la parte central del edificio, los pisos superiores del 3 al 37 están

destinados al uso de oficinas por lo que todo el espacio libre alrededor del núcleo estructural lo ocupan las oficinas.

Por último los pisos 38, 39 y 40 lo ocupan restaurantes y en este último un bar con vista de 360 grados sobre la ciudad, hasta el piso 39 llega el área central donde se ubica la zona de servicio, accediendo al piso 40 únicamente mediante dos escaleras liberando el resto del área para el bar.

Figura 114
Distribución de las plantas y corte del edificio 30 St Mary Axe

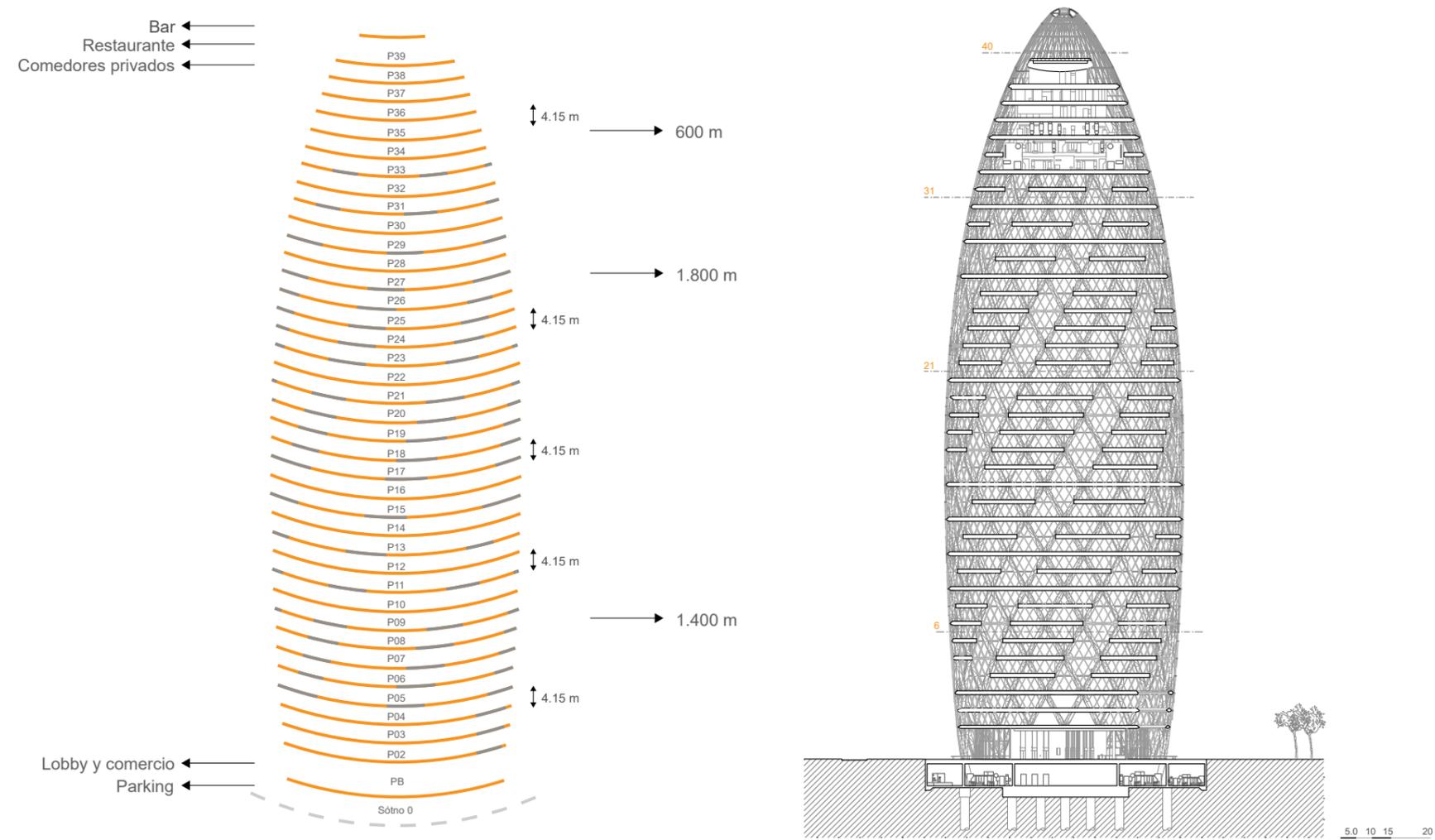


Figura 115
Identificación de la estructura en las plantas del edificio 30 St Mary Axe

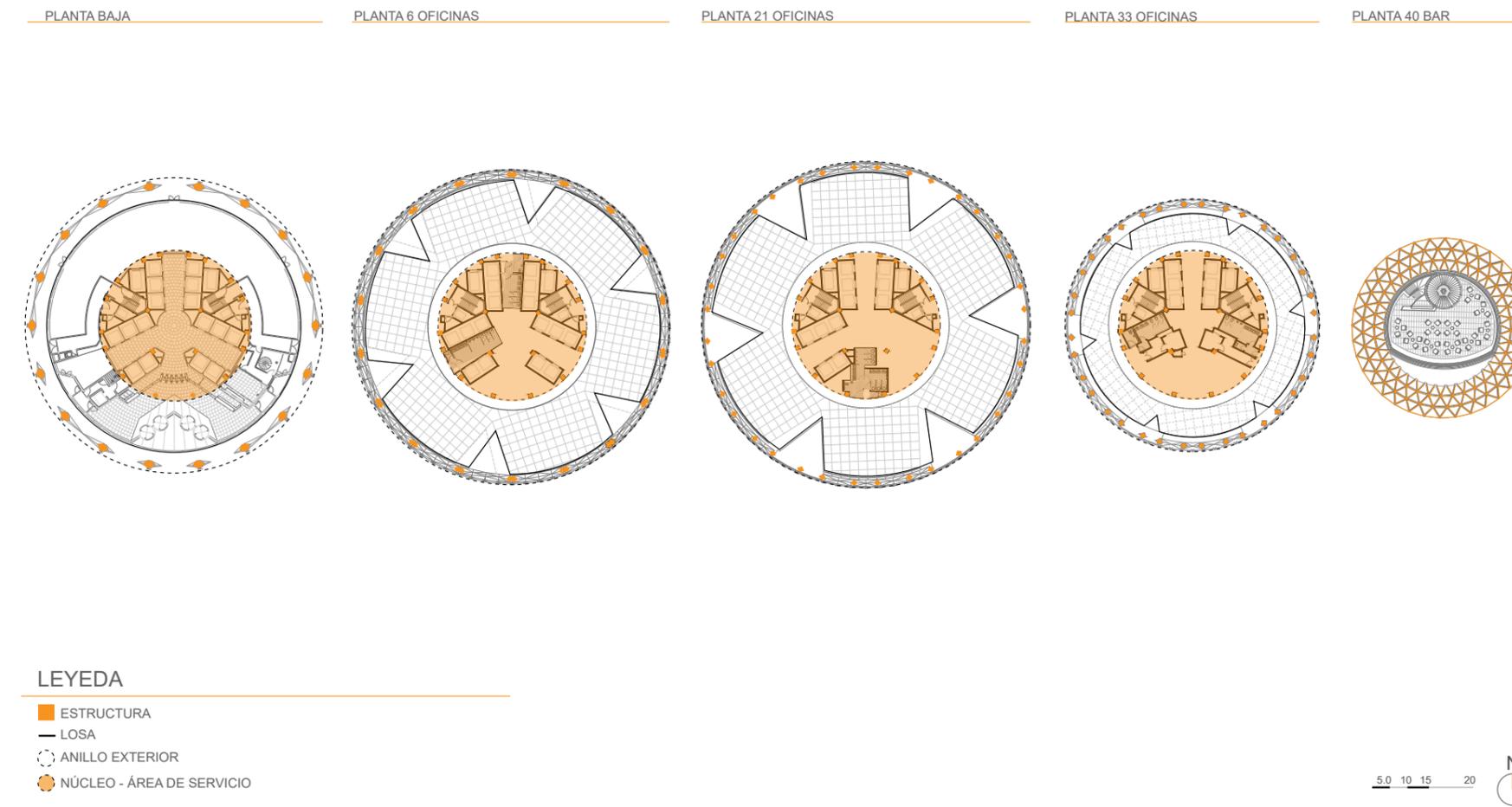
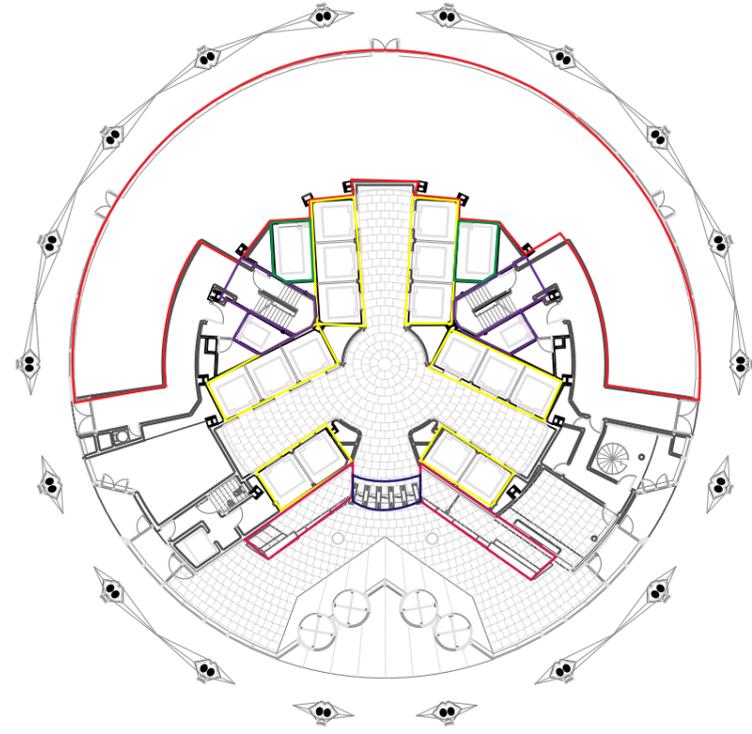
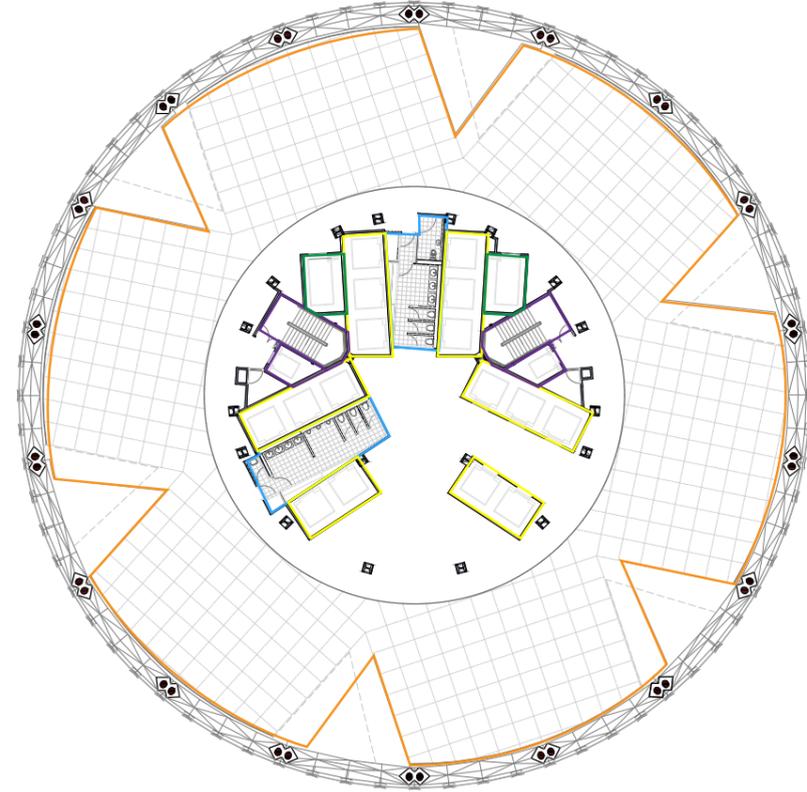


Figura 116
Identificación de los espacios en las plantas del edificio 30 St Mary Axe

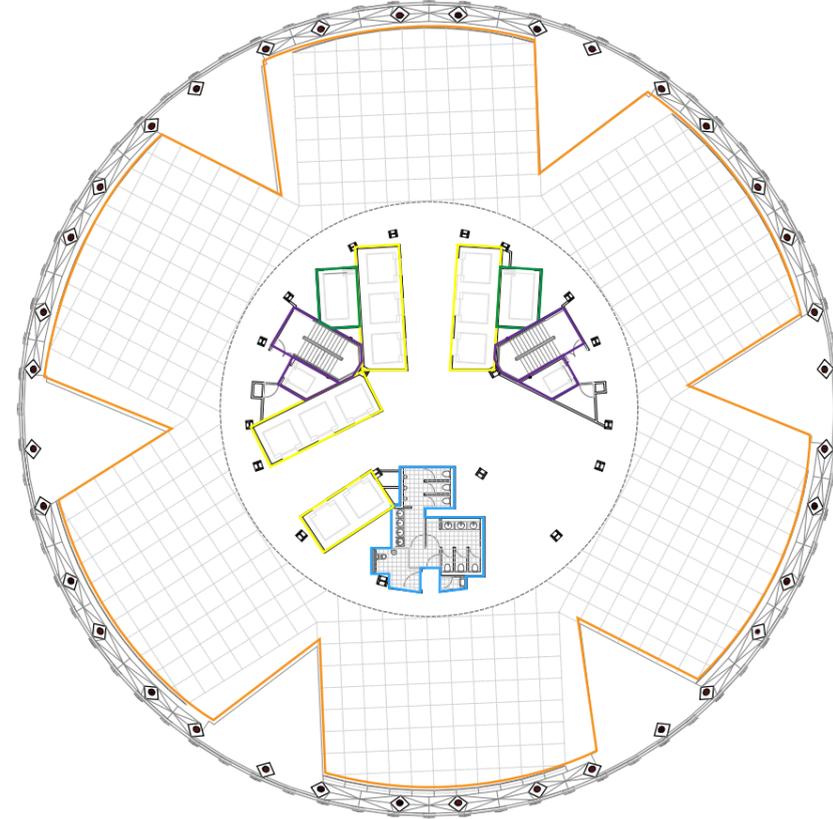
PLANTA BAJA



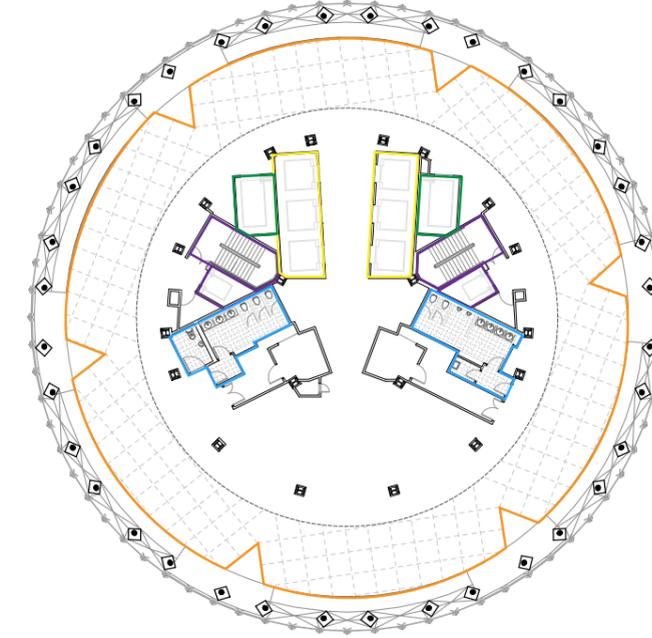
PLANTA 6 OFICINAS



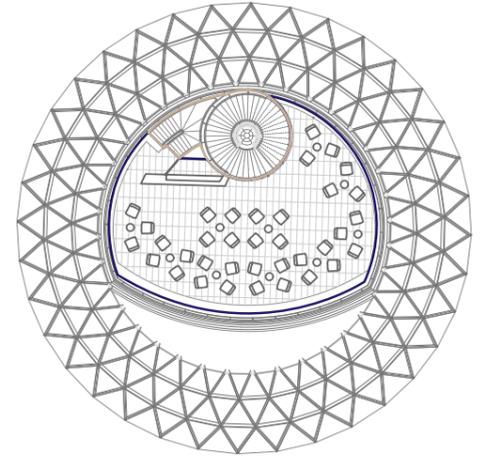
PLANTA 21 OFICINAS



PLANTA 33 OFICINAS



PLANTA 40 BAR



LEYENDA

- | | | | |
|---|---|--|--|
| — AL POR MENOR | — ASCENSORES DE CARGA | — BAÑOS | — BAR |
| — RECEPCIÓN | — ASCENSORES PÚBLICOS | — ÁREA DE OFICINAS | — ASCENSORES |
| — TORNIQUETES | — CIRCULACIÓN DE EMERGENCIA | — ESCALERAS | — RESTAURANTE |

5.0 10 15 20



- **Circulación y accesos.** El acceso principal al 30 St Mary Axe está condicionado por la estructura diagrid del edificio, el espacio de circulación en planta baja que se deja entre fachada y fachada no es suficiente para la circulación fluida de las personas hacia las 4 puertas giratorias que conforman el acceso principal debido a la gran estructura exterior que obliga a retroceder el acceso para así ganar mayor espacio y no existan obstrucciones, una vez dentro del edificio la circulación se establece a partir de la disposición de la estructura interna del núcleo del edificio que genera un espacio principal central donde se encuentran los ascensores y escaleras, por lo que de aquí nacen las circulaciones horizontales de forma radial para luego unirse a una circulación libre en base al perímetro de la estructura nuclear que se repite hasta el piso 38, ya que a partir de aquí los pisos 38, 39 y 40 lo ocupan restaurantes y bar que al ubicarse en

la parte más estrecha del edificio la circulación se reduce.

En cuanto a la circulación vertical existen 18 ascensores de pasajeros, además, hay ascensores de mercancías y de bomberos, así como un ascensor de aparcamiento hasta la recepción desde el sótano. Dos elevadores de lanzadera especiales sirven a los pisos superiores del edificio y el resto se dividen 3 niveles diferentes: los ascensores de poca altura van desde el vestíbulo hasta el nivel 12, los ascensores de altura media van desde el vestíbulo hasta el 22 con parada desde el nivel 11, los ascensores de gran altura van desde el vestíbulo hasta el 34 con parada desde el nivel 22; el ascensor lanzadera va del nivel 34 al 39. Y al piso 40 se accede únicamente por escaleras y, además existen escaleras de emergencia en todos los pisos.

Figura 117
Circulación vertical del edificio 30 St Mary Axe

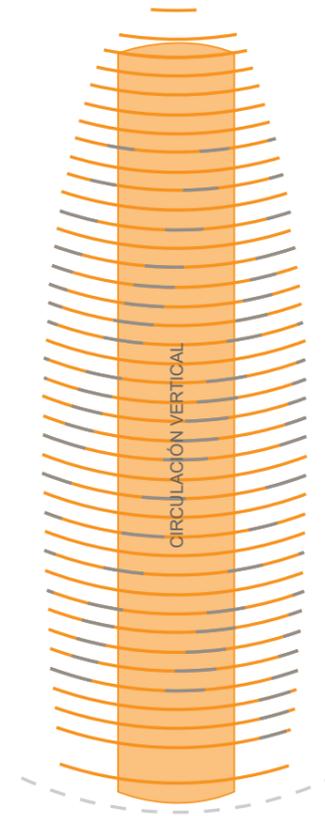


Figura 118
Circulación en base a la estructura del edificio 30 St Mary Axe

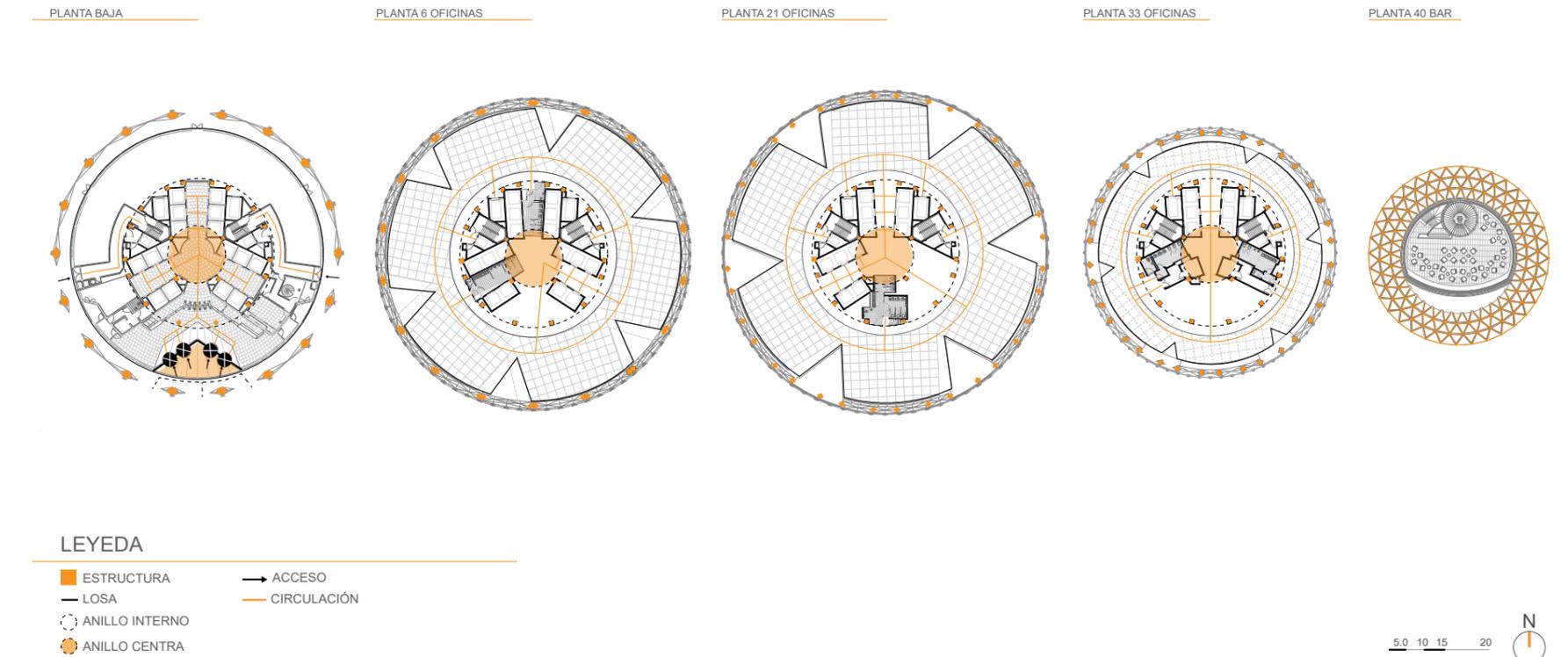
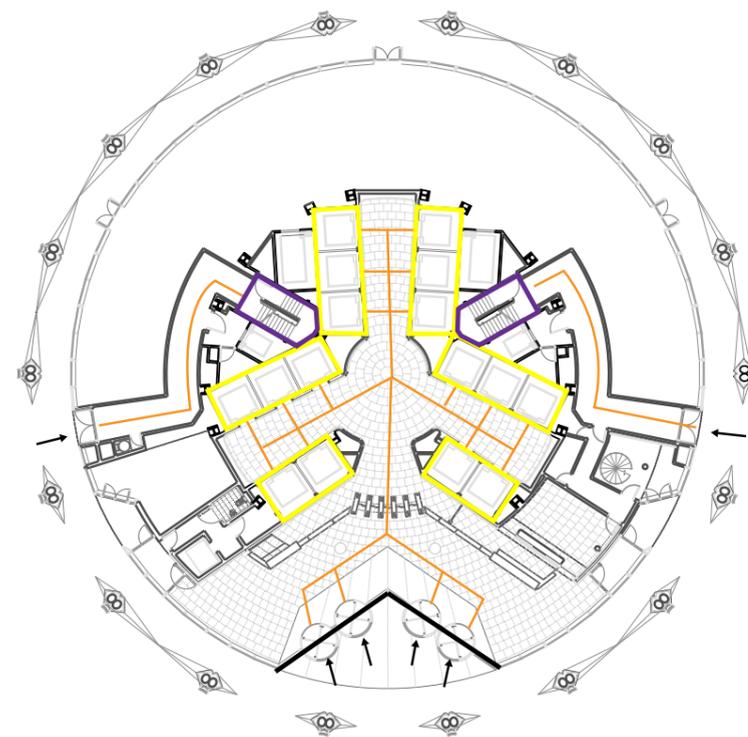
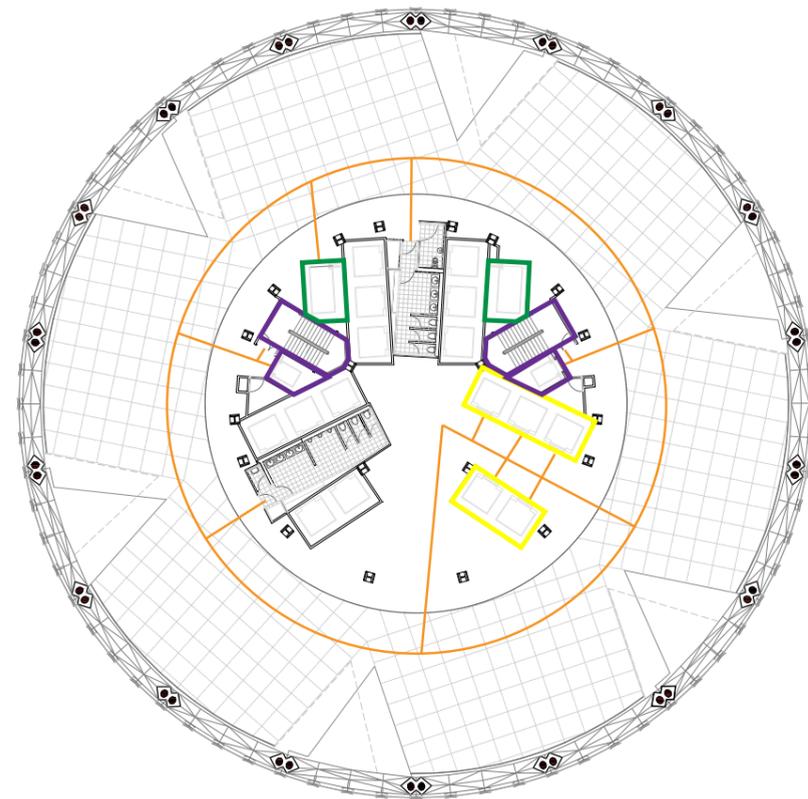


Figura 119
Circulación y accesos del edificio 30 St Mary Axe

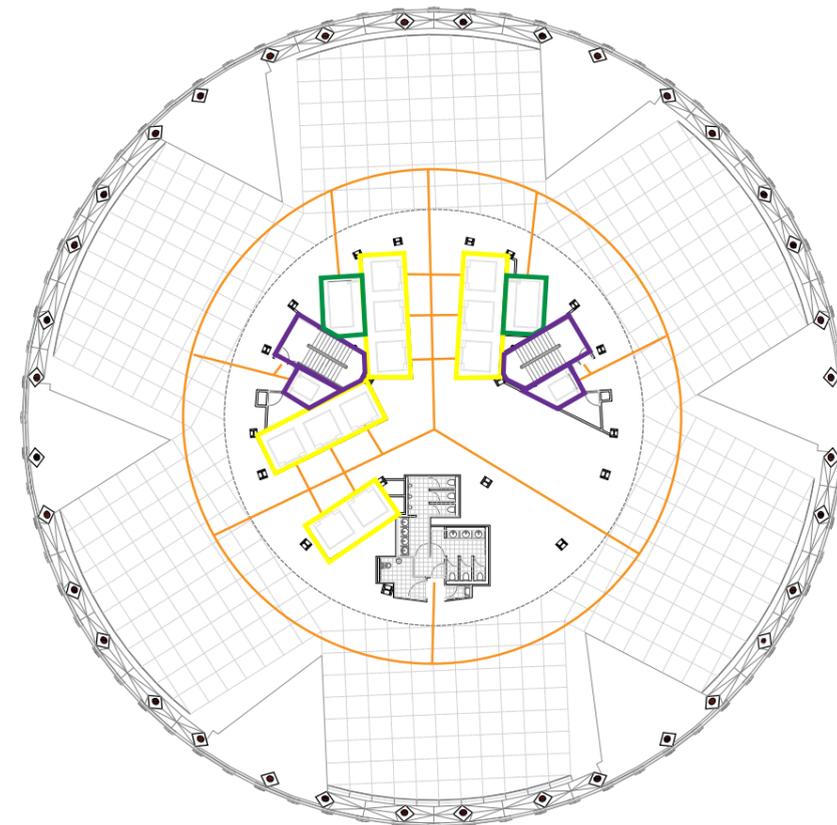
PLANTA BAJA



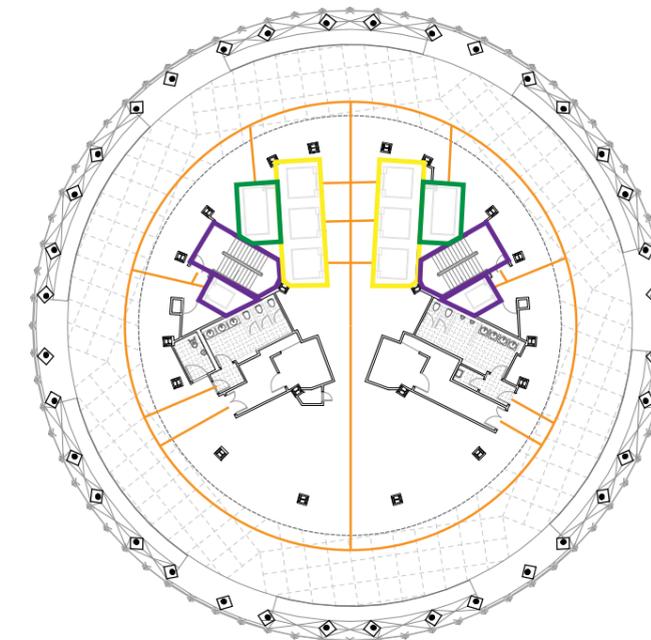
PLANTA 6 OFICINAS



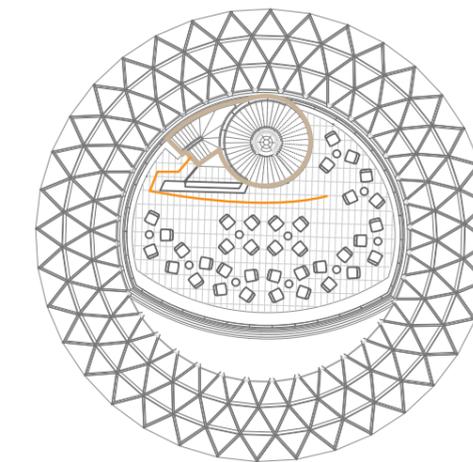
PLANTA 21 OFICINAS



PLANTA 33 OFICINAS



PLANTA 40 BAR



LEYENDA

- ACCESO
- CIRCULACIÓN
- ASCENSORES DE CARGA
- ASCENSORES PÚBLICOS
- CIRCULACIÓN DE EMERGENCIA
- ESCALERAS
- ASCENSORES

5.0 10 15 20



3.2.4.3. Fachada

El 30 St Mary Axe se compone por una doble fachada, la fachada exterior consiste en una piel triangular que envuelve todo el edificio con doble acristalamiento con paneles planos, Xavier De Kestelier, miembro del Grupo de modelado especializado de Foster + Partners, expresa que en el Gherkin solo existe un panel curvo, que es la lente que culmina la parte superior del edificio. A pesar de la forma curva del proyecto todas las piezas de vidrio son planas, la percepción de la curvatura se logra mediante una serie de paneles poligonales planos, mientras más pequeños y más paneles tenga, más real será esta ilusión óptica.

La fachada interna se compone por puertas corredizas de vidrio laminado, la cual se separa de la fachada externa a 1 – 1,5m y cuenta con cortinas automatizadas, para bloquear

el deslumbramiento y el aumento de calor. Para la fachada se utilizaron dos colores en el vidrio:

Las áreas frente a los atrios diagonales que giran en espiral alrededor del edificio están envueltas en vidrio de alto rendimiento teñido de gris, mientras que las áreas de oficinas están envueltas en vidrio transparente con un revestimiento de bajo rendimiento. El vidrio teñido de gris se seleccionó para reducir la ganancia solar. (Mousavi, 2012)

Las estructuras diagonales del 30 St Mary Axe se encuentran revestidas en color blanco, mientras que las barras horizontales se revisiten de negro; como resultado la estructura es visible desde el exterior como una gran malla romboidal.

Figura 120
Composición de la fachada del edificio 30 St Mary Axe

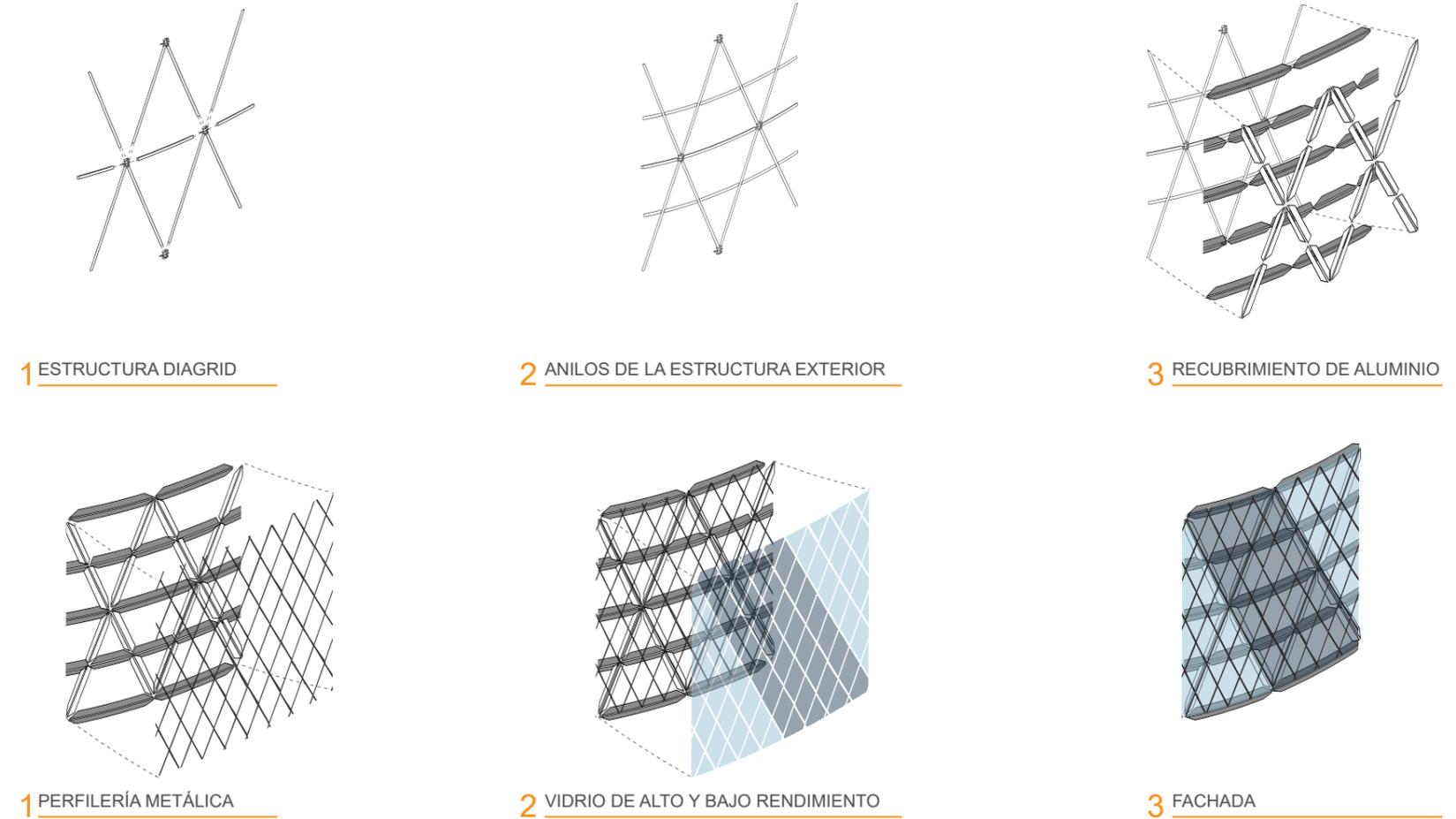
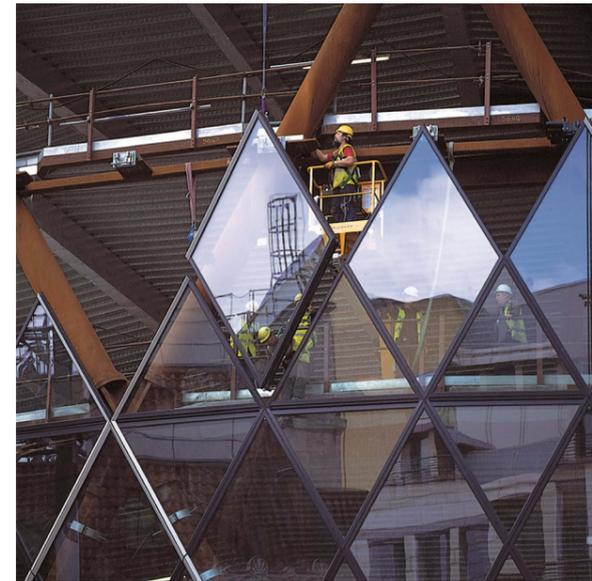


Figura 121
Fachada del edificio 30 St Mary Axe



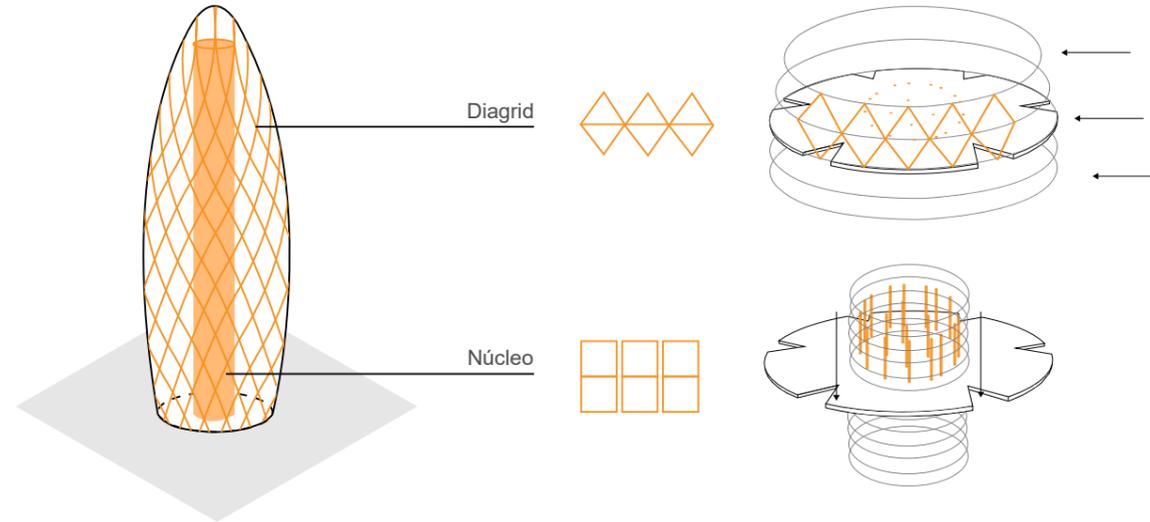
Nota. Adaptados de 30 St Mary Axe, por N. Young - Foster + Partners, 2004, (<https://www.fosterandpartners.com/projects/30-st-mary-axe/#/>), Copyright.

3.2.5. Estructura

3.2.5.1. Sistema estructural

Para la concepción de este proyecto, desde un inicio junto con la forma y la volumetría se tenía que pensar al mismo tiempo en un sistema estructural que solucionara, se incorporara y posibilitara la construcción del proyecto, debido a la forma inusual con que se concibió este edificio en altura. El grupo Arup junto con Foster + Partners fue el encargado de realizar el diseño estructural del edificio el cual consiste en dos sistemas estructurales: La diagrid, que es la estructura principal encargada de resistir cargas horizontales y el núcleo que se encarga de resistir las cargas de gravedad.

Figura 122
Composición de la estructura, edificio 30 St Mary Axe



Envolvente estructural

- **Diagrid.** La diagrid en sí, consiste en secciones de tubos de acero que se cruzan y que siguen la curvatura del edificio y brindan soporte vertical al piso, lo que brinda el beneficio adicional de un espacio de oficina sin columnas. Además de soporte estructural, la diagrid proporciona al edificio resistencia a los golpes del viento. (Arup, 2009)

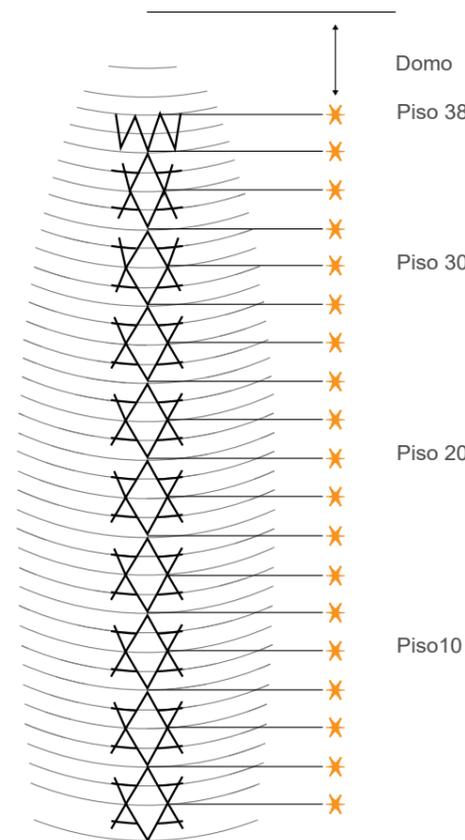
El sistema portante de la estructura diagrid se compone por grandes piezas de acero en forma de V invertida que alcanzan una altura de dos niveles; 18 de estas piezas son las que conforma los aros o anillos de la armadura exterior, que en total completan 19 aros en toda la extensión del edificio; estos elementos horizontales “también convierten la diagrid en una carcasa triangulada muy rígida, lo que proporciona una excelente estabilidad a la to-

Nota. Adaptado de *Steel superstructure starts on Swiss Re London headquarters*, Foster + Partners, 2001, (<https://www.fosterandpartners.com/news/archive/2001/10/steel-superstructure-starts-on-swiss-re-london-headquarters/>), Copyright.

Figura 123
Estructura Diagrid, edificio 30 St Mary Axe



Figura 124
Esquema de los nodos en la estructura Diagrid



re” (Munro, 2016). Estos 19 aros estructurales ayudan a que la diagrid no se despliegue, contrarrestando la extensión horizontal de la estructura.

La estructura de diagrid y los aros del 30 St Mary Axe “forman un exoesqueleto que distribuye cargas verticales a lo largo de las líneas diagonales de los miembros de acero, eliminando la necesidad de columnas en el interior” (Moussavi, 2012). Este diseño de la estructura permite que el interior de las oficinas sea un espacio abierto e ininterrumpido, ya que no se necesita de columnas internas que den soporte, volviendo a los espacios flexibles.

Para la imagen del edificio se quería que to-

das las vigas y la malla estructural diagrid se conecten de manera eficiente en los diferentes ángulos de cada uno de los pisos del edificio, lo cual fue posible gracias a la utilización de nodos como elementos conectores.

Para simplificar la construcción, Arup diseñó nodos de acero de 360 ° para conectar el complejo diagrid. Los nodos constan de tres placas de acero, soldadas entre sí en diferentes ángulos. Las conexiones ayudaron a que la diagrid fuera sencilla y rentable de construir. (Arup, 2009)

- **Núcleo.** Toda la estructura perimetral diagrid establece una envolvente resistente, por

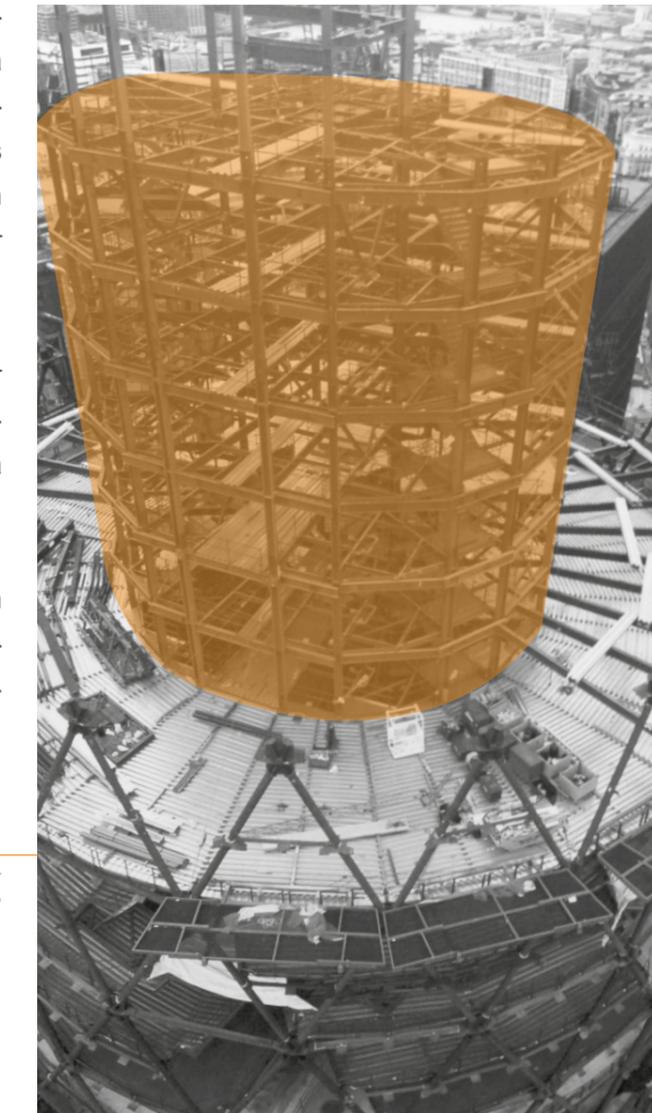
lo que el núcleo “no necesita resistir las fuerzas del viento y puede diseñarse como una estructura de acero de plano abierto que proporciona un espacio interno adaptable. Las cargas de cimentación también se reducen en comparación con un edificio estabilizado por el núcleo” (Munro, 2016).

El núcleo también se encarga de garantizar que el sistema de aros horizontales no se amplíe hacia afuera, convirtiéndose en un ancla hacia la diagrid.

Además, que la estructura diagrid tenga un núcleo, hace que sea resistente a los esfuerzos de las cargas laterales que produce la torsión.

Nota. Adaptado de *Structural Systems*, (https://faculty.arch.tamu.edu/media/cms_page_media/4433/30StMaryAxe_1.pdf), Copyright.

Figura 125
Estructura del núcleo, edificio 30 St Mary Axe



3.2.7.3. Construcción.

Todos los elementos estructurales tanto vigas, columnas y la malla diagrid son de acero; los marcos y recubrimientos son de aluminio para cumplir con las regulaciones contra incendios, y se utilizaron 5.500 paneles de vidrio en forma de rombo para la fachada externa, entre vidrio de alto rendimiento teñido de gris y vidrio transparente con revestimiento de bajo rendimiento.

El proceso de construcción del 30 St Mary Axe inicia con la cimentación, para lo cual se tuvo que excavar en forma circular para la colocación de 333 pilotes, de 75cm de diámetro a una profundidad de 27m.

Una vez resuelta la cimentación se inicia la construcción del núcleo de acero con escaleras y algunos refuerzos temporales.

Luego, se levanta una plataforma para el núcleo y se marcan puntos de referencia. Posteriormente, se construye la diagrid con la estructura en forma de V invertida preensamblada en el suelo y en seguida se incorporan las vigas radiales y se encajan a los nodos, para luego colocar los aros horizontales que completan la malla estructural.

Después de esto, se realiza la estructura del entrepiso con el steel deck, la malla electro soldada y la fundición del concreto. En paralelo a este proceso, se constituye la fachada en el exterior con los paneles de vidrio en forma de rombo y en el interior con las puertas corredizas de vidrio.

Por último, se coloca la estructura de la cúpula preensamblada, con la ayuda de grúas se cubre de vidrio y se remata con la única pieza convexa del edificio.

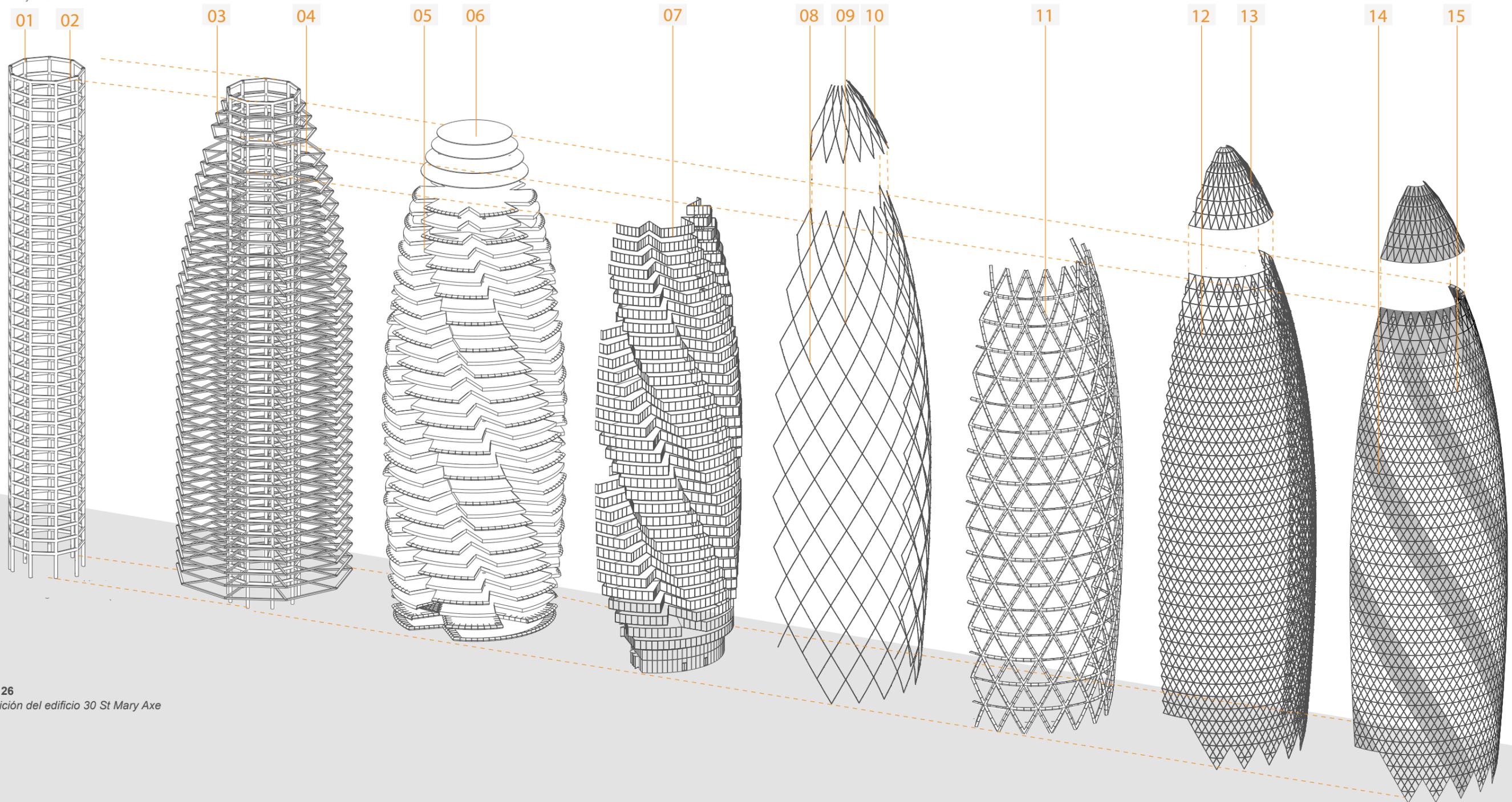


Figura 126
Composición del edificio 30 St Mary Axe

- 01 Columnas metálica del núcleo, perfil H
- 02 Viga metálica del núcleo, perfil IPE
- 03 Viga metálica de bore, perfil IPE
- 04 Viga metálica radiales, perfil IPE
- 05 Losa steel deck
- 06 Puertas corredizas de vidrio - fachada interna
- 07 Estructura diagrid - tubos de acero
- 08 Nodos prefabricados de acero
- 09 Estructura de acero de la cúpula
- 10 Revestimiento de aluminio
- 11 Perfilera metálica
- 12 Sub-estructura metálica de la cúpula
- 13 Panel de vidrio transparente de bajo rendimiento
- 14 Panel de vidrio gris de alto rendimiento

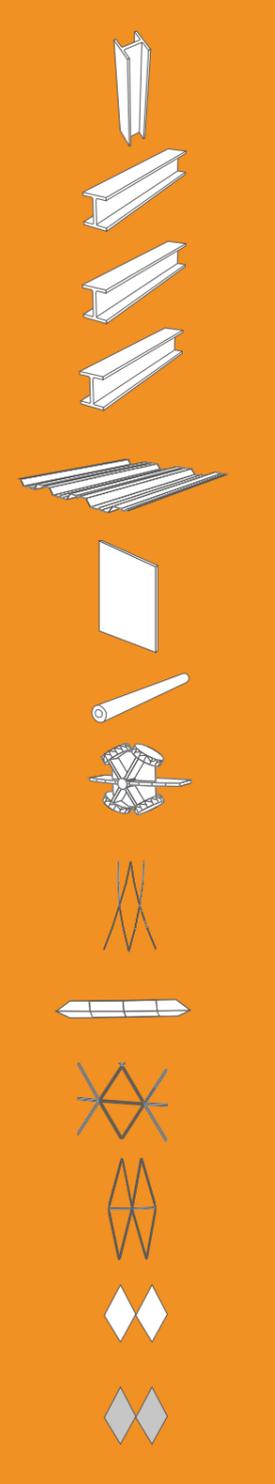
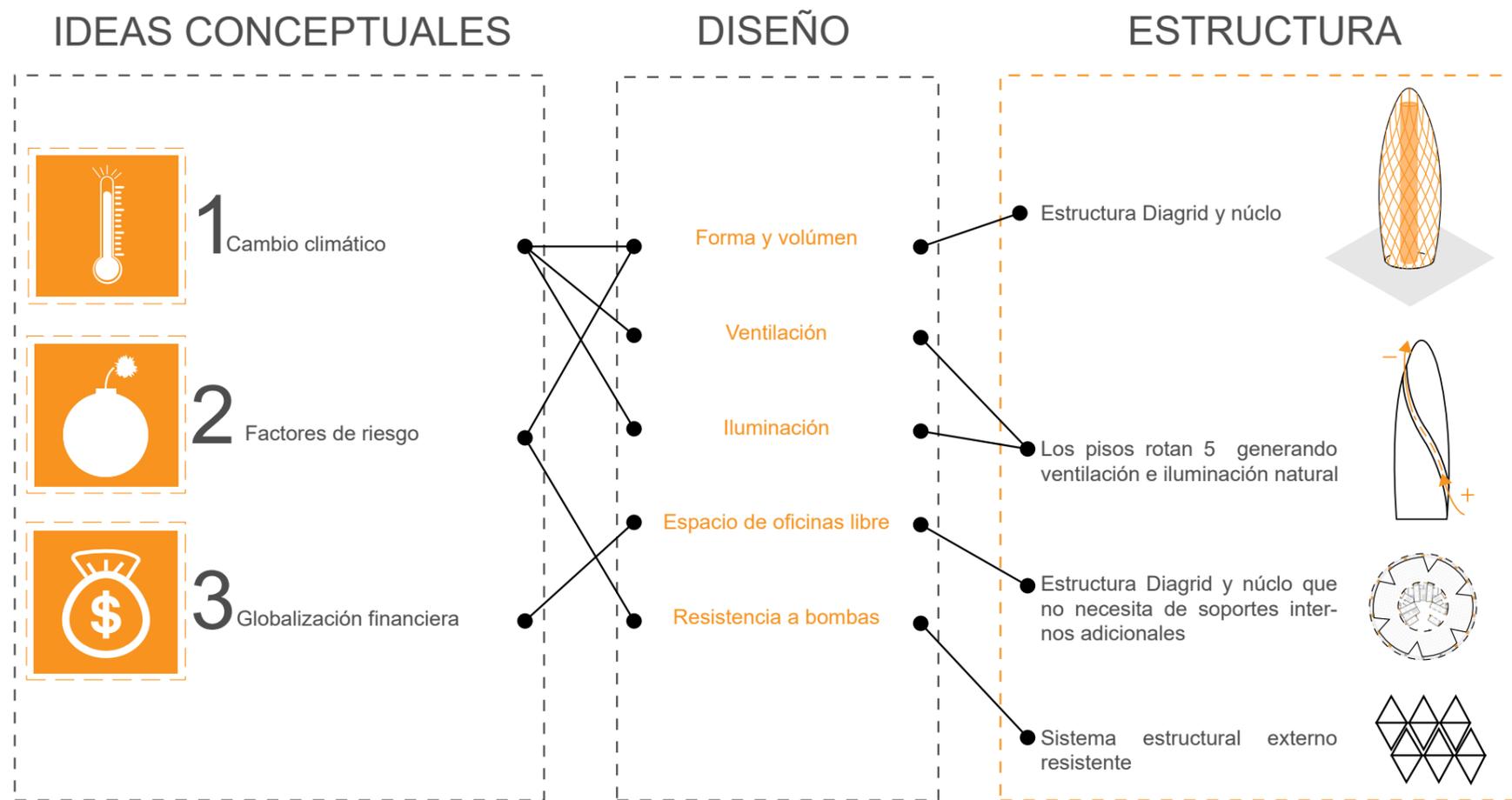


Figura 127
Relación entre las ideas conceptuales, el diseño y la estructura, edificio 30 St Mary Axe



3.2.5.3. Integración con el proyecto

La estructura del 30 st Mary Axe no solo responde al soporte y la estabilidad del edificio, sino que también guarda relación con todos los elementos; la estructura se piensa casi de manera implícita en cada idea y estrategia de diseño, no existe una separación en el proceso, debido a que Foster trabajo de la mano con el grupo de ingeniería Arup para hacer posible la visión global del proyecto y llevar a cabo su construcción.

Desde la forma y volumen se tuvo que pensar en la estructura general del edificio, ya que inicialmente se desarrollaron las ideas del diseño en base a Climatoffice, donde el cerramiento del Pabellón consistía ya en una estructura de cuadrícula diagrid de acero y piel vidriada con forma curva, debido a que el arquitecto conocía muy bien que para las formas curvas, este

tipo de malla estructural es la que mejor funciona y posibilita la construcción de la forma diseñada, por lo que a lo largo del proceso de diseño del 30 St Mary Axe se mantuvo de cierta manera este cerramiento estructural que otorga la forma al edificio, estando presente siempre la relación entre volumen y estructura en cada una de las formas concebidas desde 1998 hasta el 2000.

Para la iluminación y ventilación natural la estructura también juega un papel fundamental y es la que posibilita esta estrategia de diseño bioclimático. Las 6 aberturas que tienen las losas y el giro de 5 grados de una respecto a otra en todos los niveles, forma todo un sistema de bahías en espiral claves para la iluminación y ventilación natural del edificio, siendo el diseño de la estructura de los forjados el que ayuda a materializar esta idea conceptual de un edificio ecológico.

Crear el espacio de trabajo de las oficinas del 30 St Mary Axe tampoco hubiese sido posible sin tener en cuenta a la estructura al momento de plantear esta idea, el área de oficinas es un espacio abierto, flexible y sin interrupciones gracias a sus dos sistemas estructurales de diagrid y núcleo, el cual no necesita de columnas internas para resistir las acciones horizontales y gravitatorias. Además, el diseño de las losas crea balcones en los diferentes niveles, donde los trabajadores pueden establecer conexiones visuales entre las plantas con vistas hacia dentro y fuera del edificio, generando un espacio renovador tan necesario en el ambiente de trabajo.

Otro de los puntos principales en el diseño del Gherkin fue el factor de riesgo, por los atentados terroristas que sucedieron, por lo que la estructura del edificio tenía que asegurar la resistencia a cualquiera de estos riesgos.

La estabilidad lateral de la cuadrícula perimetral proporciona una resistencia superior a las explosiones, así como redundancia estructural en caso de que una bomba o un vehículo golpee parte de la jaula de acero. El muro cortina que reviste la diagrid mejora la protección que brinda: los consultores que trabajaron en el proyecto notaron que la forma de doble curva del edificio, clave para la desviación del viento, reduciría significativamente el impacto de las fuerzas de explosión en caso de otro bombardeo adyacente al sitio. Las hojas de vidrio endurecido y laminado diseñadas para flexionarse y luego romperse en guijarros inofensivos se colocan en cordones profundos y acolchados capaces de absorber energía de explosión adicional. (Massey, 2013)

3.2.5.4. Valor compositivo y formal

En planta baja la doble fachada se separa, dejando un espacio perimetral abierto alrededor del edificio, lo que genera que la estructura tome protagonismo desde la plaza; este carácter dominante de la estructura en la fachada exterior respecto a la fachada interior, resalta y enfatiza los potentes elementos estructurales en forma de V, dando el efecto como si nacieran del suelo. Este espacio y separación crea un carácter autónomo de la malla estructural en la fachada, proporcionando una visión diferente de la estructura a nivel de la calle.

En los pisos superiores donde se desarrollan oficinas, la estructura diagrid es mucho más visible al interior, por la proximidad hacia los grandes elementos estructurales tipo V invertida en todo el perímetro de la planta, que al ser totalmente acristalada se los puede obser-

var desde cualquier punto, tomando protagonismo sin opacar las visuales que se tiene de la ciudad.

En los últimos pisos la estructura es mucho más delgada y ligera, conformando el domo del edificio; desde el bar y restaurantes la malla negra triangular envuelve el espacio dando la sensación de protección y seguridad en los pisos más altos a casi 180m de altura. En este punto la estructura es claramente un elemento compositivo muy fuerte al poder apreciarse en toda la configuración del domo sin revestimiento alguno, pero a pesar de esto no compite con el protagonismo que se tiene de las vistas hacia la ciudad desde esta altura.

Desde el exterior del edificio, a pesar de que la malla diagrid se recubre por paneles de vidrio, la transparencia de estos aun permite apreciar de gran manera los diamantes blan-

cos que conforman la envolvente del 30 St Mary Axe, que en una visión total del edificio la envolvente estructural es parte inherente a la imagen del mismo, el cual es considerado un icono de Londres. Al exponer de esta manera a la estructura es que se llega a apreciar la forma del edificio por el carácter compositivo de la diagrid; tanto en su interior, como en su exterior, como un volumen en torsión que expresa todas las ideas conceptuales, donde también las estrategias aplicadas son visibles y comprensibles.

Figura 128
Fotografías del edificio 30 St Mary Axe



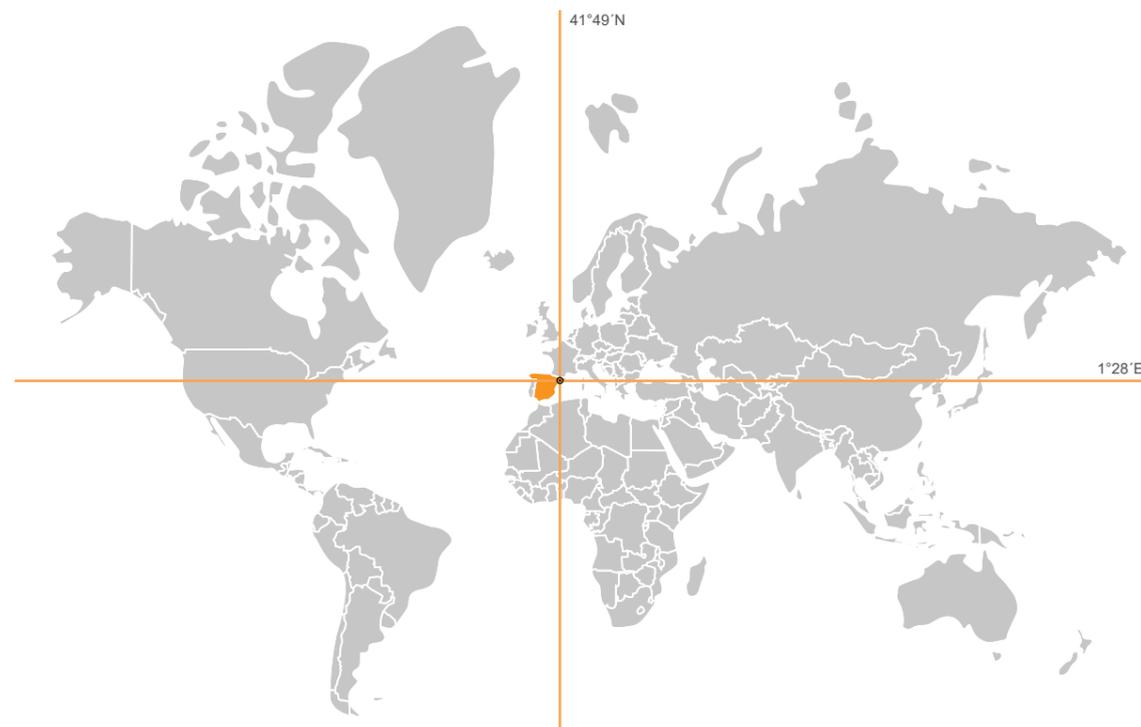
Nota. Adaptados de 30 St Mary Axe, por N. Young - Foster + Partners, 2004, (<https://www.fosterandpartners.com/projects/30-st-mary-axe/#/>), Copyright.

3.3. Análisis de la Torre Agbar

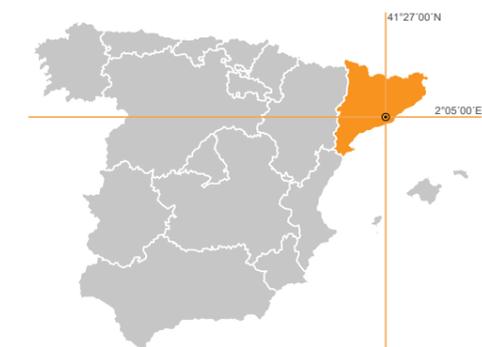
3.3.1. Contexto y emplazamiento

La Torre Agbar se ubica en la ciudad de Barcelona, Cataluña, en el distrito de San Martín, frente a la plaza de las Glorias. El plan de Cerdà (1859) posicionó a esta plaza, como el centro de Barcelona porque allí confluyen las tres arterias más importantes de la ciudad; la Gran Vía, la Diagonal y la Meridiana y es precisamente en este punto donde está situada la Torre Agbar, en la intersección de la calle Badajoz y la Avenida Diagonal que dan paso a un solar triangular en El Parc i La Llacuna Del Poblenou, a metros de la Basílica de la Sagrada Familia.

Figura 129
Ubicación de la Torre Agbar



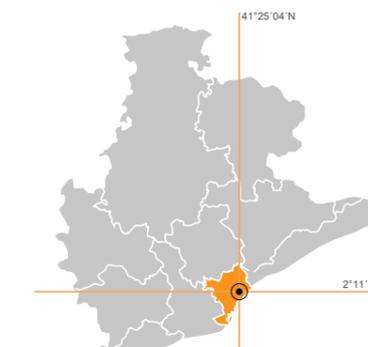
Ubicación de Cataluña, comunidad autónoma de España, situación mundial.



Ubicación de la Provincia de Barcelona, comunidad autónoma de España, situación España



Ubicación de Barcelona, Provincia de Barcelona, situación Cataluña.



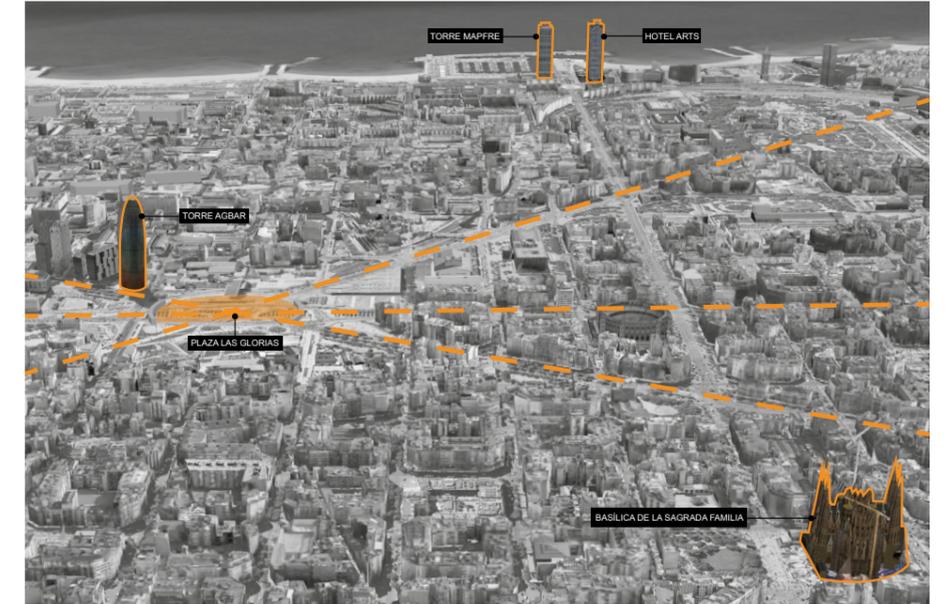
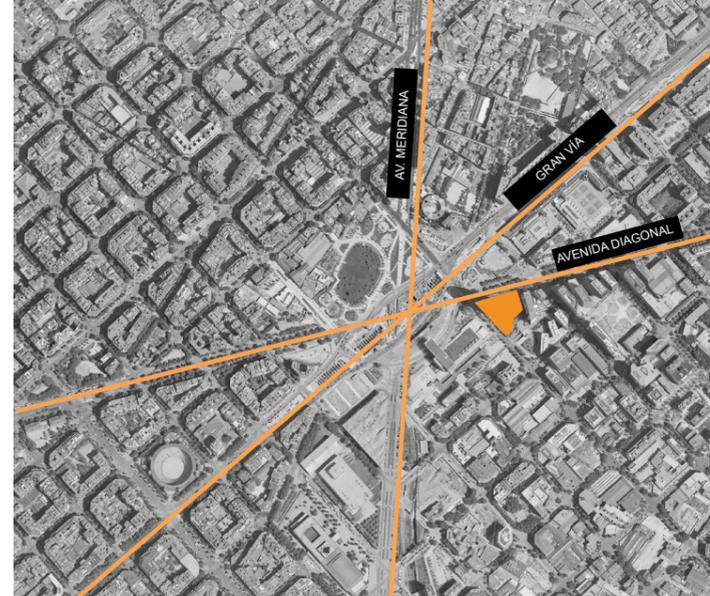
Ubicación de Distrito de San Martín, Barcelona.



Ubicación del proyecto dentro del Distrito de San Martín, Barcelona.



Torre Agbar



Nota. Adaptado de Torre agbar, por b720, 2005, (<http://b720.com/es/portfolio/torre-agbar/>), Copyright.

En 1996, la Compañía de Agua de Barcelona (AGBAR) formada por un conjunto de más de 160 empresas, una multinacional con más de 130 años de historia, hace realidad la construcción de su nueva sede central en Barcelona gracias al grupo inmobiliario Layetana, en un solar que se encuentra en un ángulo de la Plaza de las Glorias, emplazándose en una ubicación privilegiada de la ciudad, que actualmente se ha convertido en el nuevo acceso al distrito tecnológico e industrial de Barcelona llamado 22@. El Plan 22@ según Jordi Borja (2010) “tiene la voluntad de crear una zona que atrae a la nueva economía del conocimiento, preservando el carácter mixto con la residencia, mejorando la oferta de espacios públicos y creando un ambiente urbano rico y amable” (p. 103).

Con la ubicación definida, el diseño para la sede central de la Compañía de Agua de Bar-

celona tendría que ser una decisión muy bien pensada por parte de la dirección de la empresa. Santiago Mercadé, director ejecutivo de AGBAR expresó “si una empresa de la convergadura de la nuestra, con un solar en este lugar clave de la trama de Idelfons Cerdà, (...) no actúa con la mayor ambición, ya me diréis quien lo va a hacer” (Moix, 2010, p. 147).

Es así, como el diseño finalmente se desarrollado por un equipo conjunto entre el arquitecto Jean Nouvel y el estudio b720 encabezada por el arquitecto Fermín Vázquez. Esta nueva torre modificaría el perfil urbano de la ciudad, ya que para el año 2005 cuando finalizo su construcción paso a ser tercer edificio más alto de Barcelona, con 142m de altura, luego de la Torre Mapfre y Hotel Arts ambos de 154m de altura, sobresaliendo así entre la extensión horizontal de la ciudad.

Figura 130
Extensión horizontal de Barcelona, Torre Agbar



Nota. Adaptado de *Torre agbar*, por b720, 2005, (<http://b720.com/es/portfolio/torre-agbar/>), Copyright.

Figura 131
Los tres edificios más altos del área metropolitana de Barcelona

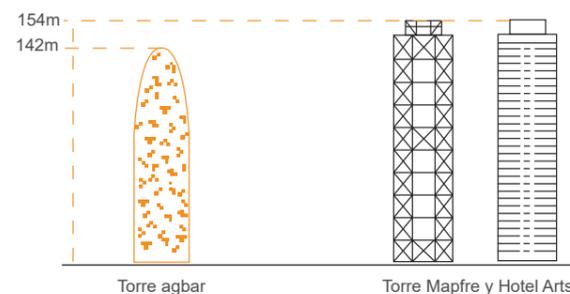


Figura 132
Ideas conceptuales del proyecto Torre Agbar



3.3.2. Ideas conceptuales

Jean Nouvel tiene su propio método personal a la hora de desarrollar un proyecto arquitectónico, lo que se ha llamado la “fabricación de conceptos”.

El modo de fabricar un concepto, según palabras de Nouvel, es el análisis. Un análisis exhaustivo de un problema concreto para luego escoger de manera selectiva unos fragmentos que, re-combinados y perfectamente cohesionados, darán lugar a un objeto nuevo, aparentemente ensimismado pero que estará en un diálogo discontinuo con su contexto.

En la Torre Agbar, estos conceptos el análisis del contexto geográfico, histórico, cultural y urbano más o menos

cercano a su emplazamiento produce una acumulación de significados discontinuos que, ensamblados, acaban por configurar el edificio. (Portella, 2006, pp 60-61)

De esta manera Nouvel, proyecta la Torre Agbar bajo el contexto que envuelve Cataluña considerando 2 elementos:

- **El Macizo de Montserrat**, apreciada como la montaña más importante y significativa de Cataluña.

- **Y la arquitectura catalana**, proyectada por uno de sus grandes exponentes Antonio Gaudí.

Estos dos elementos cohesionados producen la acumulación de significados donde explica Nouvel (2001):

En cuanto a la dimensión simbólica de la Torre Agbar, gira en torno a un vocabulario formal que pertenece a Barcelona y que es muy catalán. Hay mucha gente que no lo entiende, simplemente porque no conocen Montserrat y no saben que Gaudí trabajó con estas formas. Yo he considerado efectivamente que en la tensión de la forma de la torre con todos sus pequeños detalles podría existir una analogía con la de una presión que se aplica de manera natural sobre una directriz parabólica. Con ella trato de ponerla en relación con el espíritu del lugar.

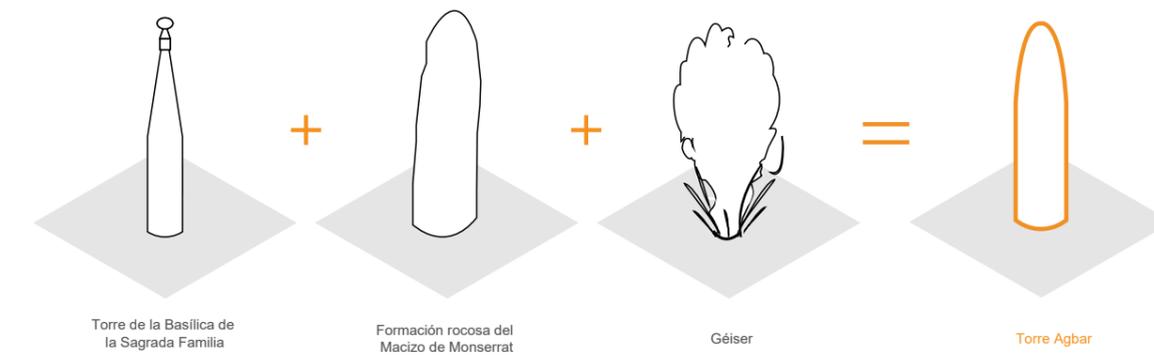
Por otra parte, Nouvel también conceptualiza la idea de la torre como un géiser que surge del suelo y con esta idea se logra incorporar de cierta manera la identidad de su cliente, la compañía de Aguas de Barcelona.

3.3.3. Forma y volumen

La forma y el volumen de la torre se proyectan en un cilindro ovoidal rematado con una cúpula sin aristas. Esta forma tan particular de un edificio en altura para el arquitecto Nouvel, es el resultado de las ideas conceptuales antes mencionadas que aluden a las referencias culturales de Cataluña; asemejando la forma de la torre a la forma de las rocas erosionadas de Montserrat y la geometría orgánica característica en la obra de Antoni Gaudí, inspirándose en especial en las torres de la Basílica de la Sagrada Familia, visible desde el solar donde se ubica el proyecto.

A esto se les suman conceptos metafóricos como la forma de un géiser que brota de la tierra, que como se expresa en la memoria del proyecto: No es una torre, un rascacielos en el sentido estadounidense del término: es

Figura 133
Forma y volumen de la Torre Agbar



un surgimiento único en medio de una ciudad bastante tranquila. Pero no una vertical esbelta y vigorosa como las torres o las torres que generalmente marcan las ciudades horizontales. No, es más bien una masa fluida que habría perforado el suelo, un géiser con presión permanente y medid. (Nouvel, 2005)

3.3.4. Diseño

3.3.4.1. Estrategias

Nouvel diseñó la Torre Agbar bajo las ideas conceptuales antes mencionadas dando lugar a un lenguaje simbólico característico de su manera de proyectar, como Nouvel expresa:

Sí una torre se lee como construida en acero, en piedra o en ladrillo; o si se siente el peso de las cosas. Me gusta que su naturaleza desafíe un poco

Figura 134

Muro y recubrimiento de la Torre Agbar



las leyes de la materialidad. Es puramente simbólico claro, y tiene que ver también con la ilusión (...) Y en efecto, me gusta jugar con esta paradoja de la solidez y de la fragilidad. (Nouvel, 2003, p. 11)

Y es precisamente la desmaterialización el foco central del diseño, lograda gracias a las tres capas que se usaron en la fachada:

La capa interna, pertenece a la estructura del edificio que es un muro de hormigón armado con múltiples perforaciones aleatorias, las cuales están pensadas en función a la orientación y la exposición al sol; es decir, al sur de la fachada se encuentran menos perforaciones que al norte.

Nota. Reproducido de *Torre Agbar, Barcelona*, por R. Vargas, 2005, (<https://arquitecturaviva.com/obras/torre-agbar>), Copyright.

La capa intermedia consiste en chapas de aluminio ondulado de diferentes colores; el resultado es una gradación cromática que empieza con colores de tierra en la parte inferior del edificio, colores rojizos en la parte media y acaba con colores azules y en la parte superior de la cúpula se deja de utilizar colores finalizando en la transparencia del vidrio.

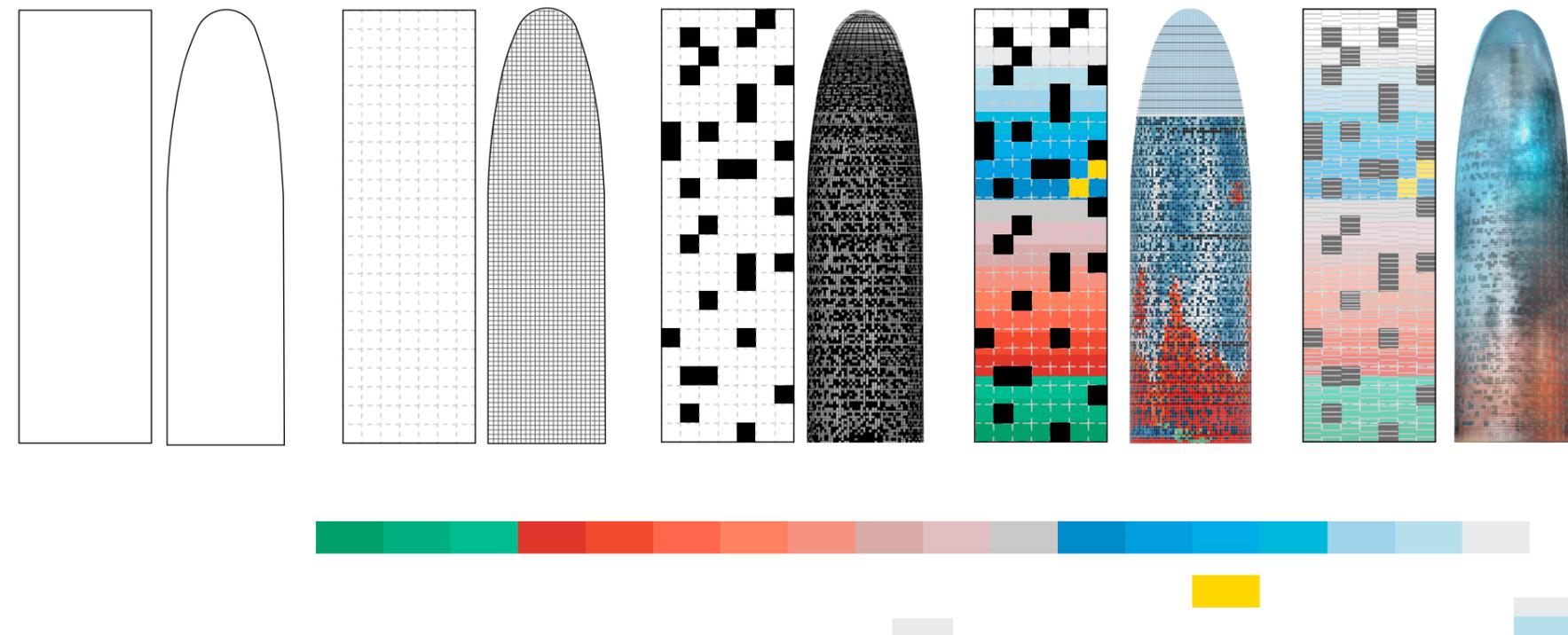
La capa exterior se encuentra conformada por láminas de cristal traslucido, transparentes, hasta serigrafiados, difuminando los colores de la capa intermedia que gracias a los reflejos del cielo y el sol, dan la sensación de que el edificio cambia de tonalidades.

Es así como estas tres capas en conjunto evocan un objeto salido del suelo que se va

desmaterializando a medida que sube al cielo hasta que de cierto modo se llega a confundir con él. Como Nouvel describe en la memoria del proyecto:

La superficie del edificio evoca el agua: lisa, continua pero también vibrante y transparente ya que el material se puede leer en profundidad, coloreado e incierto, luminoso y matizado. Esta arquitectura proviene de la tierra, pero no tiene el peso de la piedra. Aunque pudiera ser un eco lejano de las viejas obsesiones formales catalanas llevadas por los misterios del viento del lado de Montserrat. Las incertidumbres de la materia y la luz hacen vibrar el campanario de Agbar en el horizonte de Barcelona. Un espejismo lejano de día y de noche. (Nouvel, 2005)

Figura 135
Esquema de la idea de desmaterialización en fachada de la Torre Agbar



Otro de los puntos importantes del diseño es la sostenibilidad, ya que se hace uso del diseño bioclimático a través de la fachada, en donde el muro de hormigón y el recubrimiento exterior crea una capara de aire que forma una ventilación natural y sirve como un cojín térmico; además la torre presenta sensores de temperatura para controlar la apertura de las láminas de cristal de la última capa de la fachada; también las ventanas que perforan el muro son abatibles y se cierran o se abren mediante unos sensores de temperatura. Por todo esto la fachada disminuye el consumo energético en temas de climatización, logrando que la torre sea sostenible.

Figura 136
Iluminación y ventilación natural en fachada, Torre Agbar

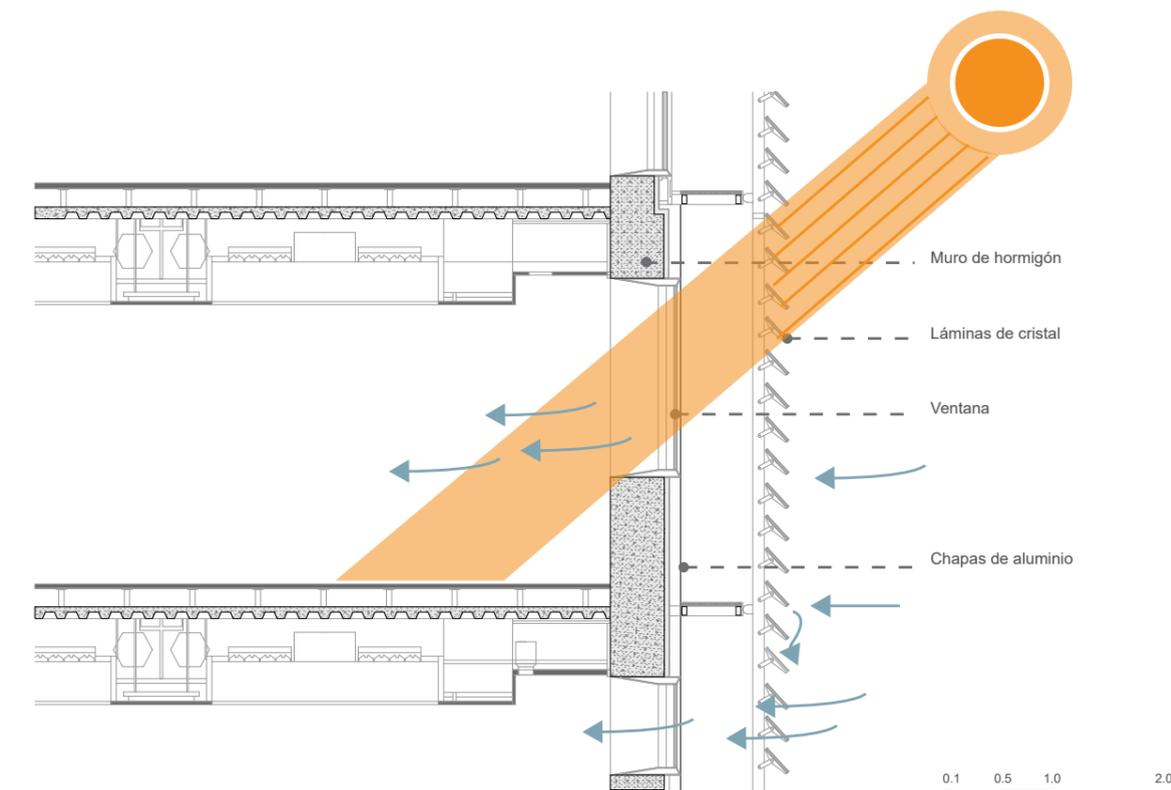
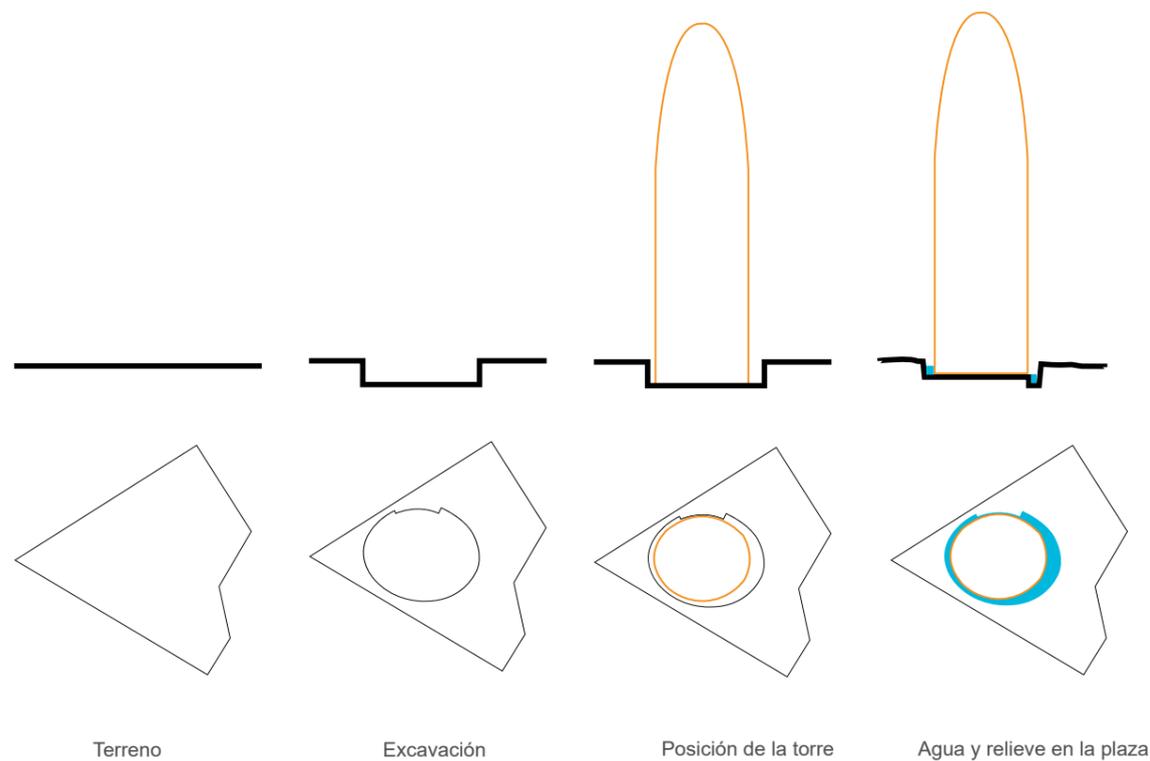


Figura 137
Esquema de la concepción de la Torre Agbar como un géiser



El volumen del edificio de planta oval ocupa solo una parte del área total del predio esquinero con forma triangular, el resto del área está destinada al espacio público, en donde se propuso una plaza que modifica su nivel 0.00 con relieves.

El encuentro del volumen cilíndrico con el suelo se diseñó de manera particular, creando un espacio para separar el perímetro de la torre de la plaza, a manera de cráter cubierto de agua, dos niveles por debajo de la cota de la calle; reafirmando aún más esta idea de algo que surge de la tierra como un géiser.

3.3.4.2. Estructura del espacio

Las plantas de la torre Agbar están conformadas por dos cilindros con forma oval no concéntricos entre sí, el edificio cuenta con treinta y ocho plantas, de las cuales cuatro son subterráneas y tres son técnicas.

Bajo rasante hay tres plantas de parking y una de servicio, el espacio subterráneo principal es un gran auditorio que se extiende debajo de la plaza, estos 4 niveles ocupan toda el área del predio por debajo del suelo donde se ubica el proyecto.

La distribución de las zonas en planta desde el nivel 0 se rige por la estructura, tanto el cilindro exterior como el interior son autopor-

tantes lo que permite que no se necesite de estructura adicional como columnas internas para la estabilidad del edificio, de esta manera el núcleo oval que se mantiene en todas las plantas, alberga toda la zona de servicio; la única tabiquería fuera del núcleo se encuentra adosada a la fachada sureste y es donde se ubican los ascensores que brindan vistas hacia el mediterráneo. El resto del área fuera del núcleo está destinada al espacio libre de oficinas.

En total La torre posee 50.693 metros cuadrados de superficie, de los cuales 30.000m² lo ocupan oficinas, 3.210m² instalaciones técnicas, 8.132m² servicios, incluyendo un auditorio, y 9.132m² de parking.

Figura 138
Distribución de las plantas y corte de la Torre Agbar

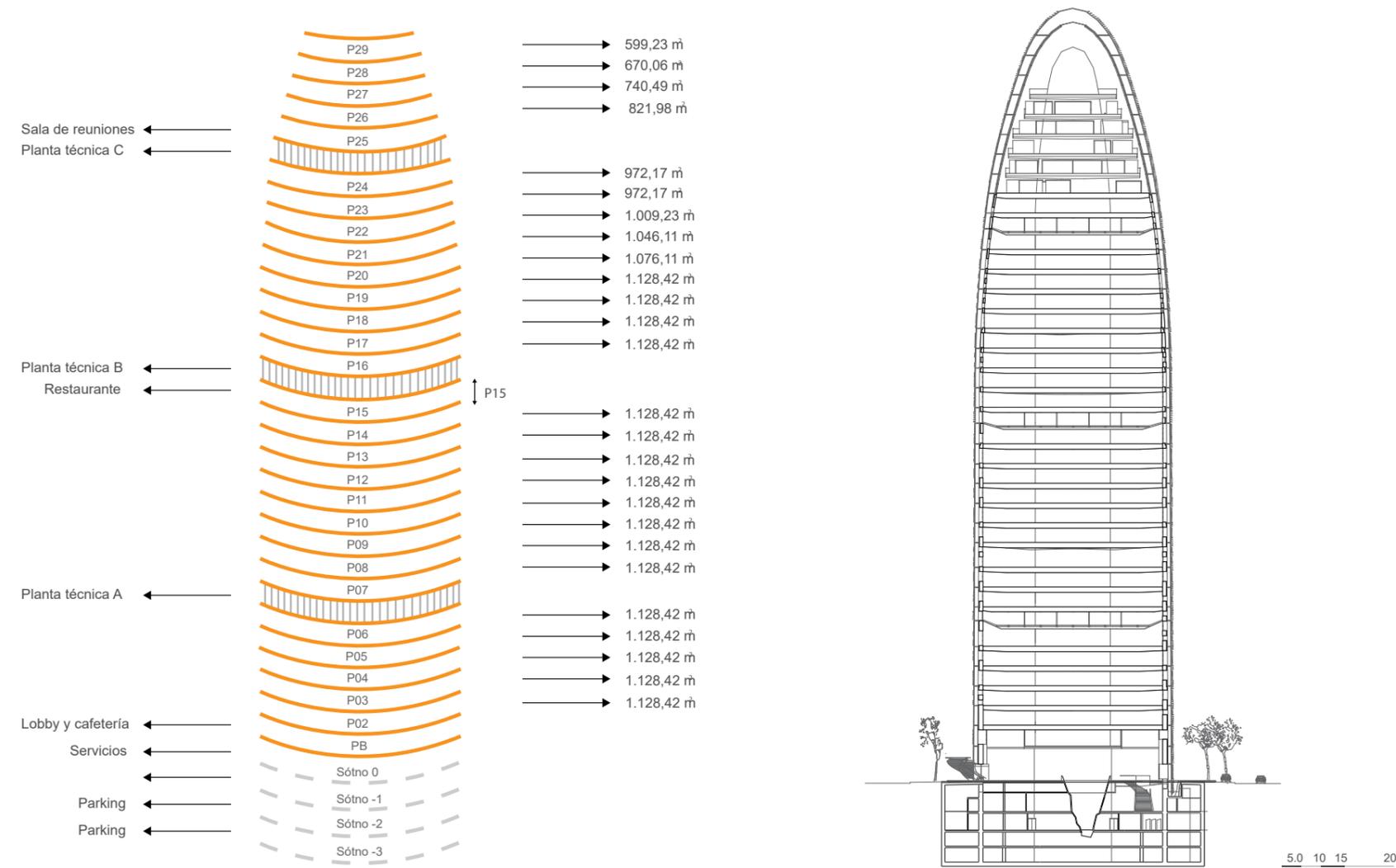


Figura 139
Identificación de la estructura en las plantas de la Torre Agbar

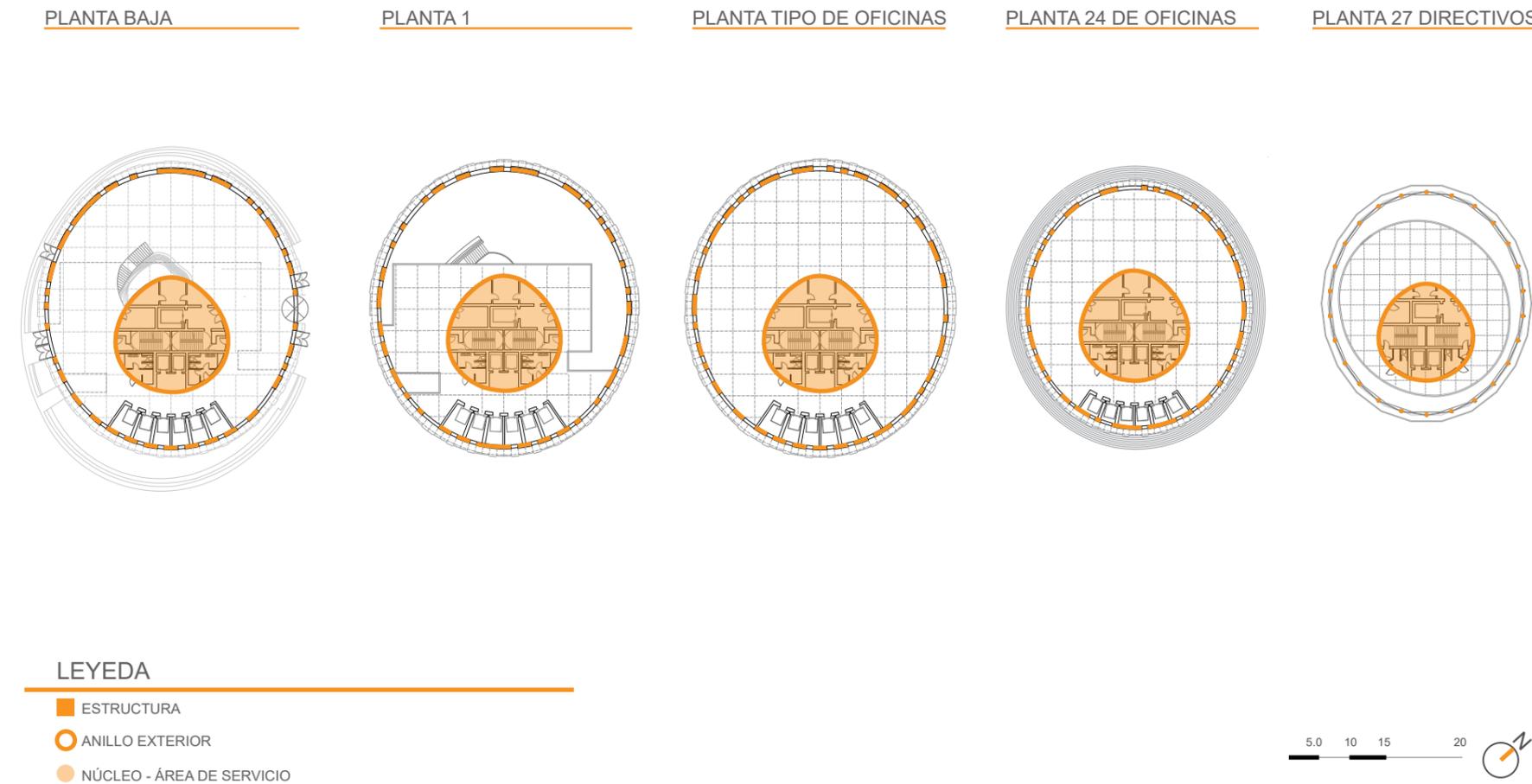
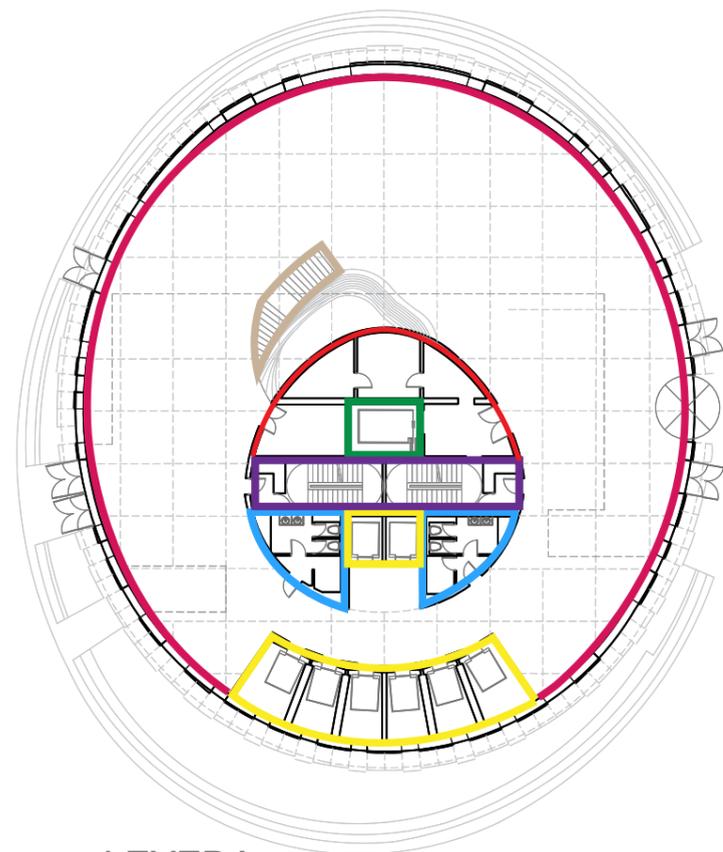
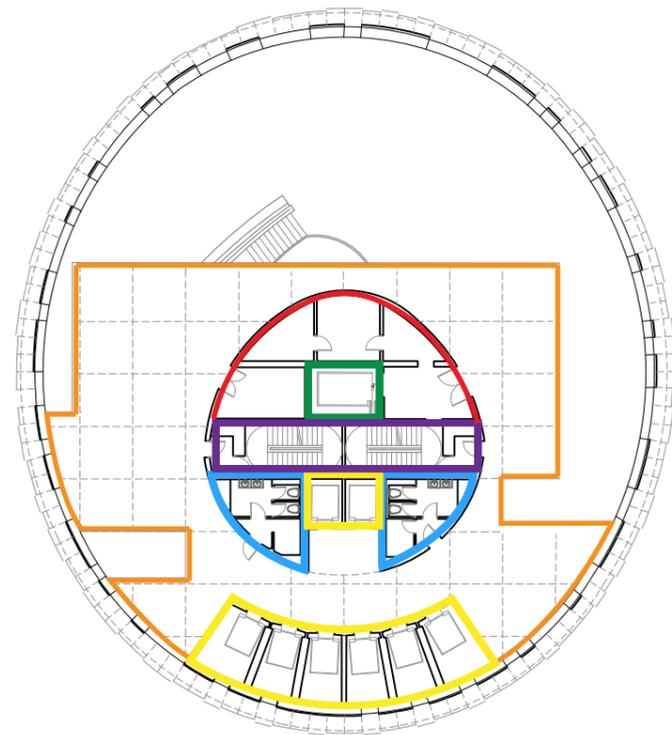


Figura 140
Identificación de los espacios en las plantas de la Torre Agbar

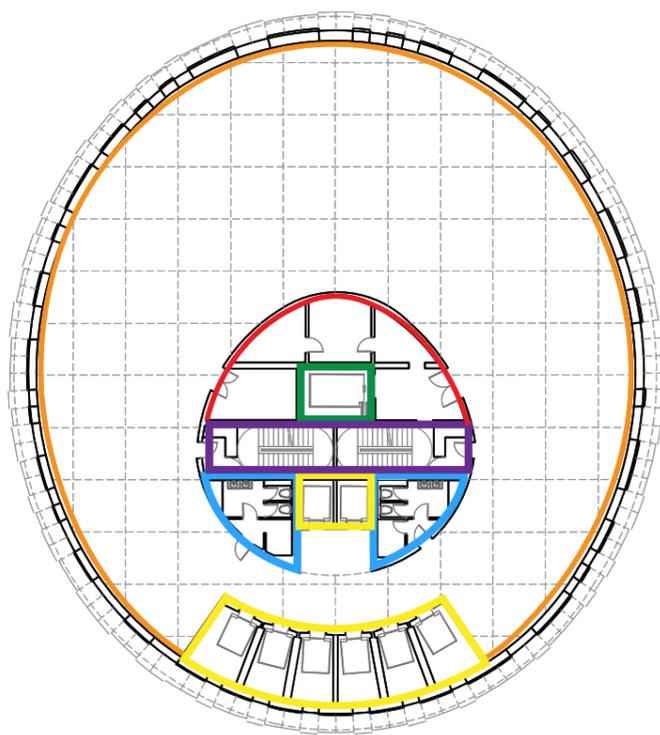
PLANTA BAJA



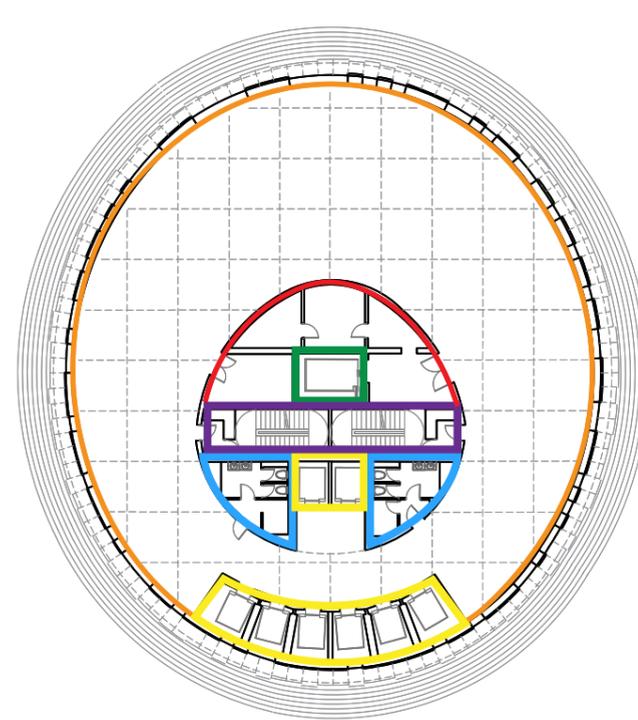
PLANTA 1



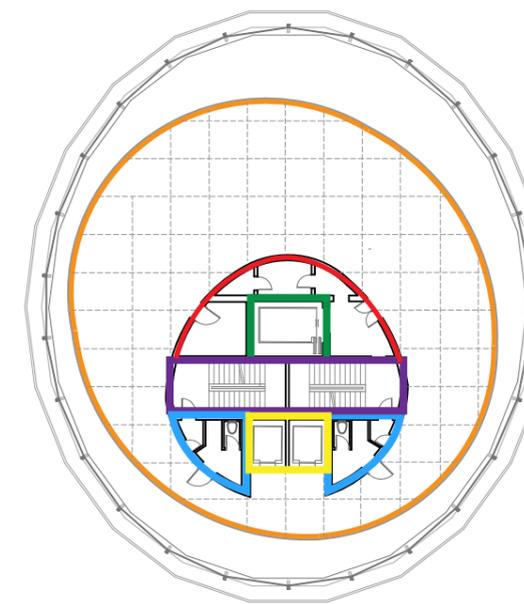
PLANTA TIPO DE OFICINAS



PLANTA 24 DE OFICINAS



PLANTA 27 DIRECTIVOS



LEYENDA

- BODEGAS
- ASCENSORES DE CARGA
- BAÑOS
- RECEPCIÓN
- ASCENSORES PÚBLICOS
- ÁREA DE OFICINAS
- ESCALERAS
- CIRCULACIÓN DE EMERGENCIA



- **Circulación y accesos.** La torre presenta cinco accesos, el acceso principal al edificio es una puerta giratoria que se encuentra en la fachada noreste, que da hacia la Av. Diagonal. En el interior de la torre la circulación se establece en torno al anillo nuclear donde se agrupa la circulación vertical con dos escaleras y tres ascensores, uno de ellos de carga, que recorren todos los niveles; junto a la fachada sureste en el anillo estructural perimetral se encuentran agrupados 6 ascensores más, que llegan solo hasta el piso 24 por la estructura no concéntrica del núcleo de la torre.

La circulación horizontal nace del núcleo del edificio y del bloque exterior de ascensores que esta frente al mismo, generando un vestíbulo del cual parte la circulación en todo el perímetro del núcleo por la planta diáfana de oficinas, lograda gracias a los dos cilindros estructurales.

Figura 141 Circulación vertical de la Torre Agbar

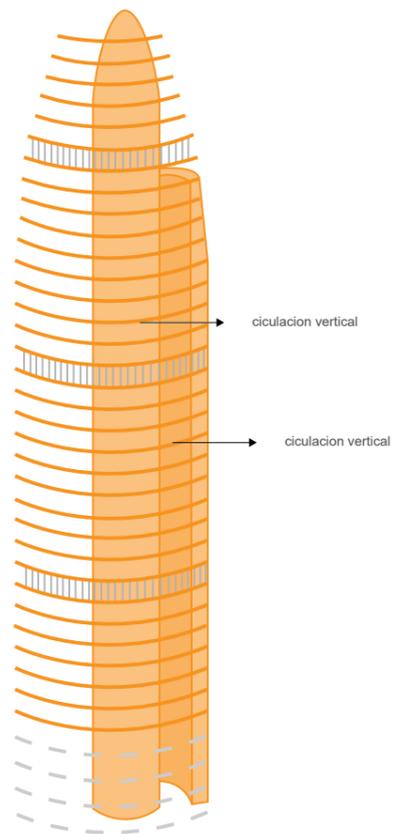


Figura 142 Circulación en base a la estructura de la Torre Agbar

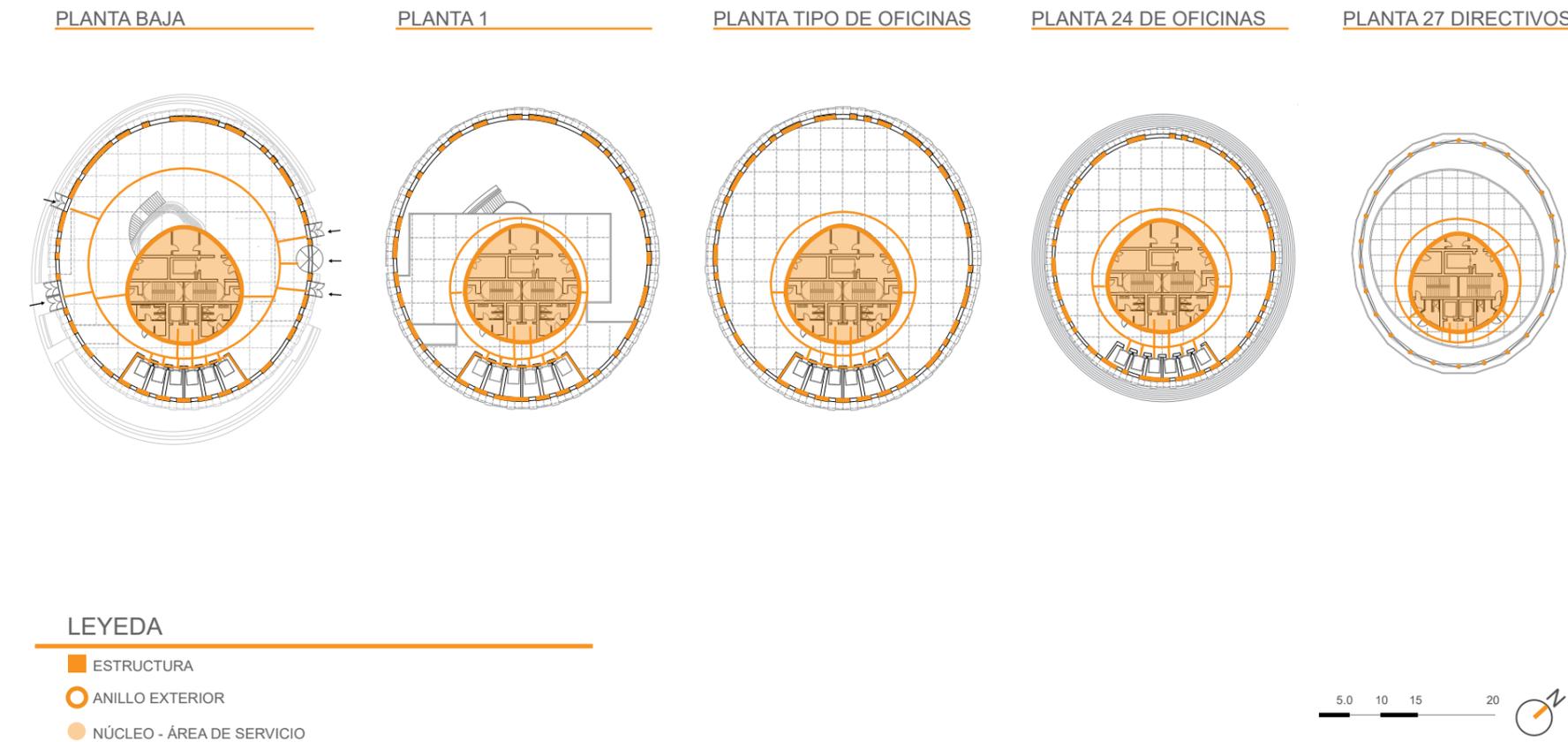
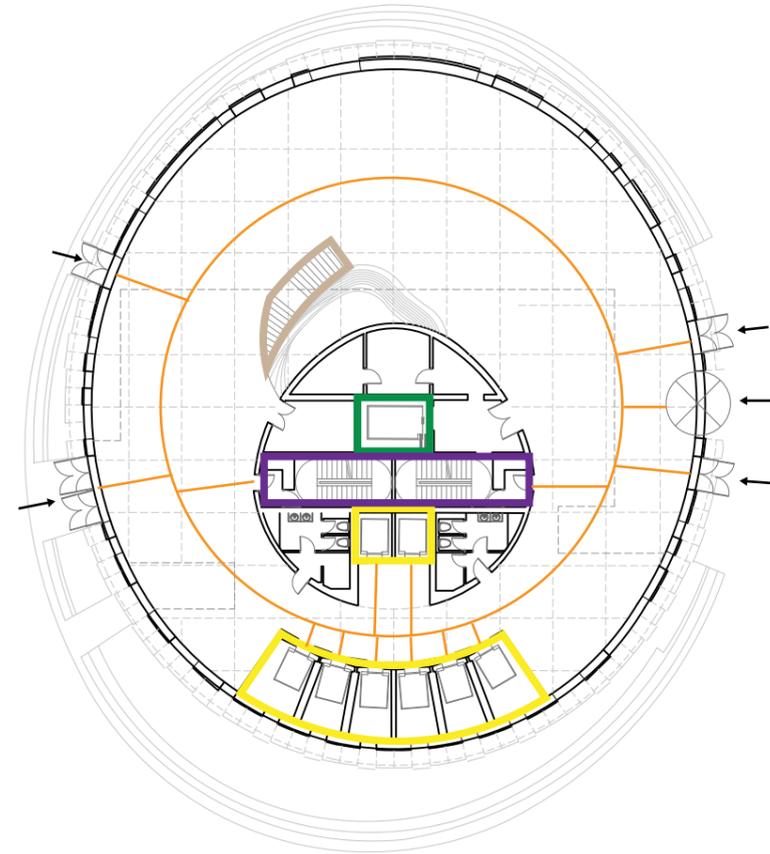
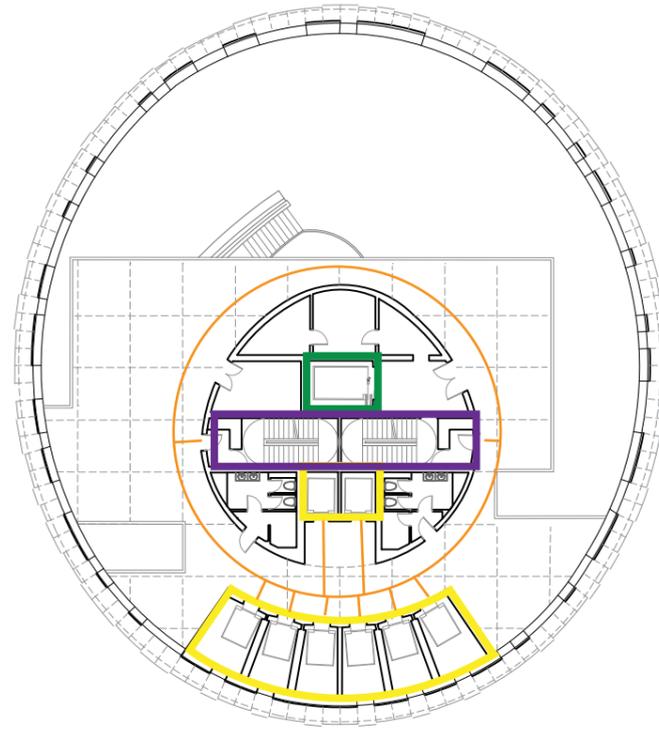


Figura 143
Circulación y accesos de la Torre Agbar

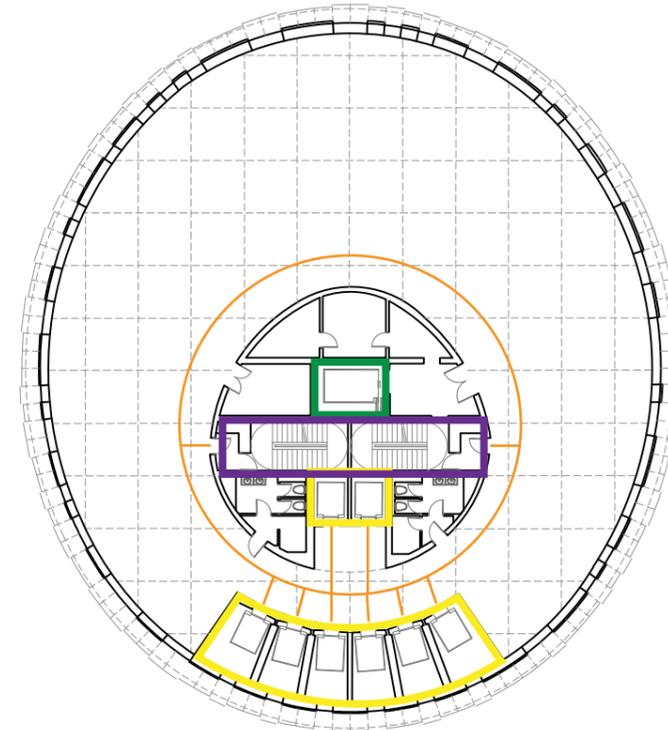
PLANTA BAJA



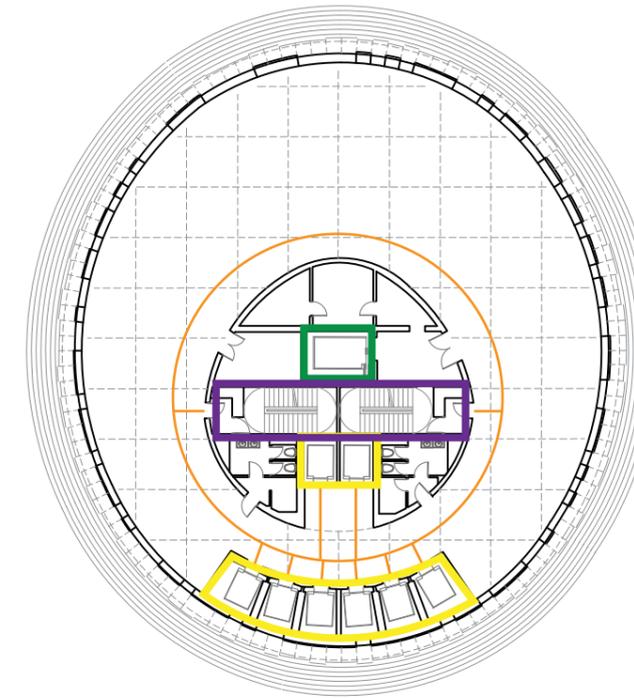
PLANTA 1



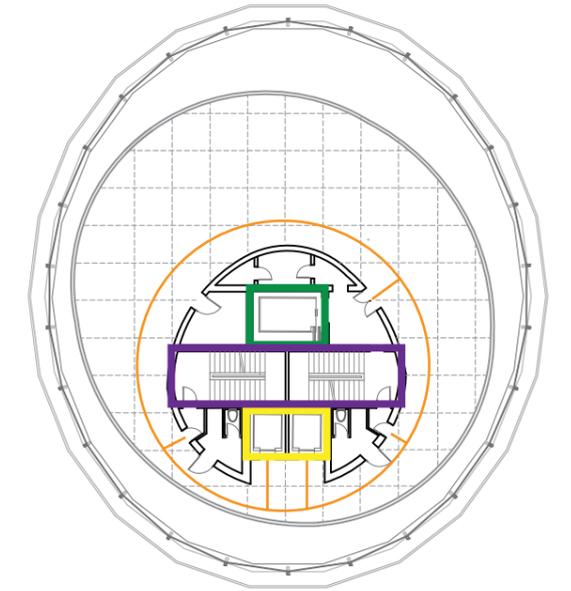
PLANTA TIPO DE OFICINAS



PLANTA 24 DE OFICINAS



PLANTA 27 DIRECTIVOS



LEYENDA

- ACCESO
- CIRCULACIÓN
- ASCENSORES DE CARGA
- ASCENSORES PÚBLICOS
- CIRCULACIÓN DE EMERGENCIA
- ESCALERAS



3.3.4.3. Fachada

La fachada del edificio es una envolvente continua, sin jerarquías debido a diseño oval de todas sus plantas; esta fachada se desarrolla en base al muro perimetral portante de hormigón armado, el cual presenta aberturas dispuestas a partir de una trama cuadrícula de vanos y llenos ubicados aleatoriamente de 92.5 cm x 92.5 cm.

Toda la estructura del muro se cubre con aislante térmico y luego se reviste con módulos de chapas onduladas de aluminio de cuarenta colores distintos; finalmente el edificio queda envuelto por una última capa de 59.619 lamas (120 cm x 30 cm) con un tratamiento distinto según el grado de insolación de cada orientación, para asegurar un acondicionamiento adecuado en el espacio interior. Estas lamas se sujetan al muro mediante una estructura

de aluminio que también soporta pasarelas de mantenimiento y limpieza.

Las aberturas del muro donde se ubican las 4.500 ventanas están diseñadas según la orientación cardinal en que se implanta el edificio por las condiciones de asoleamiento y las diversas vistas desde la torre hacia la ciudad, apuntando en dirección a la Sagrada Familia, el mar Mediterráneo, la Barceloneta, el Parc Güell o el Port Olímpic, donde las ventanas que se direccionan a estos puntos cuenta con una abertura de dos módulos en forma vertical que enmarca no interrumpen y enmarcan la vista

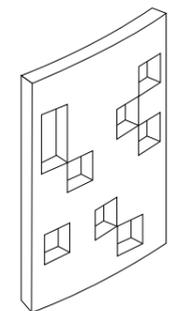
Durante la noche la Torre Agbar se ilumina por medio de un sistema LED que se encuentra en la segunda capa de chapas de aluminio, proyectando una diversa gama de colores que multiplica el cromatismo en la fachada de for-

ma significativa.

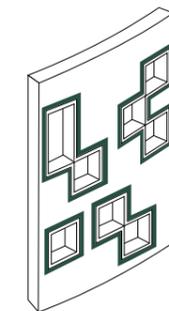
Si tomamos como ejemplo la Torre Agbar de Barcelona, lo que genera la forma es un solo elemento, repetido y expuesto a diferentes grados de iluminación. Si se mira de cerca, se pueden leer sus elementos: una placa de vidrio, un montante, una fijación. Cuando se está a treinta ó cuarenta metros de distancia, se percibe un volumen que vibra por todas partes, sin saber con precisión qué es lo que lo constituye. (Nouvel, 2003, p. 20)

Todas estas capas en fachada dejan a la estructura oculta, no siendo perceptible ni por dentro ni por fuera, todo el muro portante de hormigón armado queda en último plano para ser cubierto con vibrantes colores en el día y aún más en la noche.

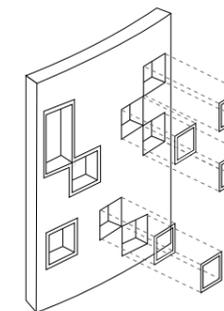
Figura 144
Composición de la fachada de la Torre Agbar



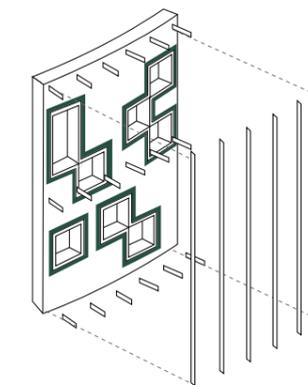
1 Muro de hormigón



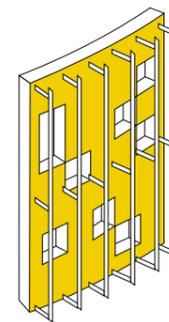
2 Ventanas



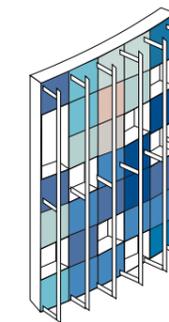
3 Bandas de estanqueidad



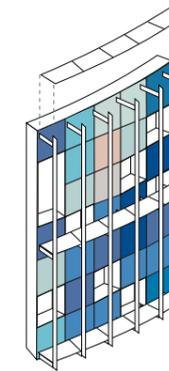
4 Anclajes, mensulas y montantes



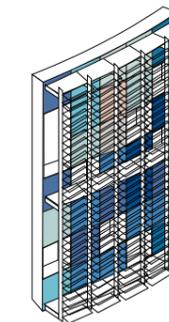
5 Aislante



6 Chapa ondulada



7 Bandejas mantenimiento



8 Lamas vidrio serigrafiado

Figura 145
Fachad de la Torre Agbar



Nota. Adaptados de *Torre Agbar, Barcelona*, por R. Vargas, 2005, (<https://arquitecturaviva.com/obras/torre-agbar>), Copyright.

3.3.5. Estructura

3.3.5.1. Sistema estructural

Para la edificación de la Torre Agbar se tuvo que pensar muy bien en el sistema estructural a implementarse, teniendo en cuenta la forma cilíndrica del edificio en altura y el diseño de cuatro niveles de subsuelo, motivo por el cual se establecieron resoluciones estructurales distintas para los sótanos y para la construcción de la torre propiamente dicha.

- Estructura de los sótanos. Existen 4 niveles que se encuentran por debajo de la cota 0, los cuales ocupan toda el área del predio esquinero, la solución estructural para los pisos subterráneos fue un sistema de losas de hormigón armado y “entramado de pilares que intenta respetar una distancia entre ellos no mayor de 8m, luz acorde con el uso de apar-

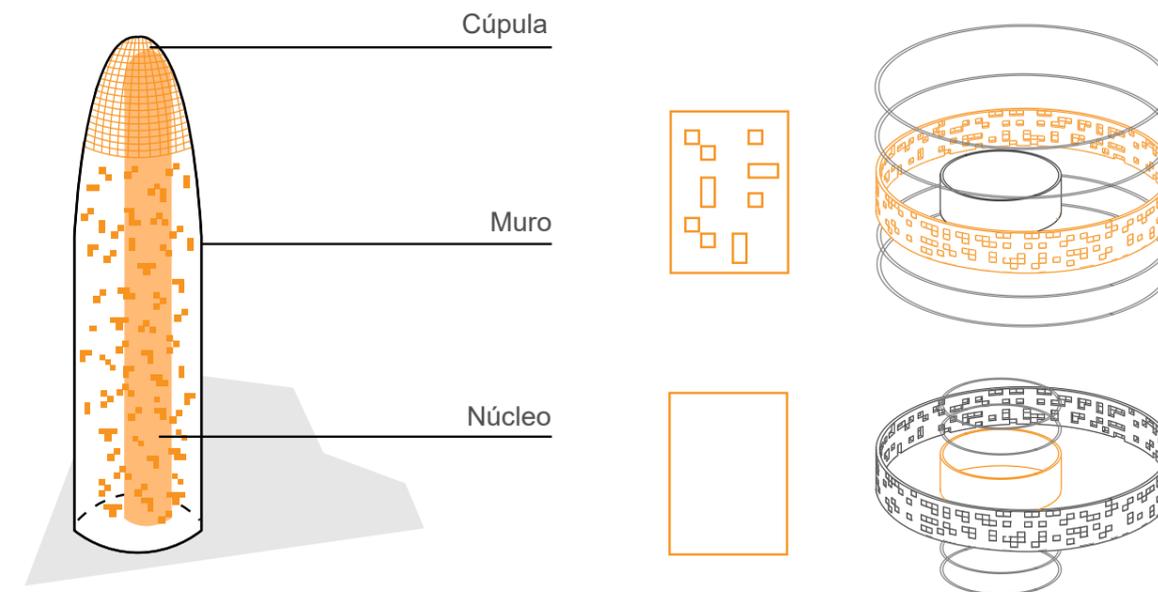
camiento en estas plantas” (Solé, 2007, p. 10).

El auditorio que también se encuentra en el subsuelo, la estructura se solucionó de forma diferente debido a la necesidad de no interrumpir el espacio con pilares, por lo que se optó por una estructura de doble curvatura que consiste en una lámina de hormigón armado aligerada con casetones de poliestireno expandido, para salvar las luces de hasta 24 metros.

- Estructura de la torre. La torre de 142m de altura desde el nivel de la calle, como se ha mencionado, tiene una planta oval que forma un volumen cilíndrico, por lo cual la estructura vertical de carga se resuelve hasta los 110 primeros metros sobre rasante, mediante un muro de hormigón armado y otro cilindro interior, no concéntrico con el anterior, proyectado igualmente en hormigón armado. Sobre estos

dos cilindros de carga se van apoyando los diferentes forjados. A partir de la cota 110m los forjados se sustentan en voladizo desde el núcleo interior, sin contacto con el perímetro exterior, que asciende hasta la cota 132m; estos forjados corresponden con las cinco últimas plantas destinadas a dirección. Cerrando todo el conjunto, nace desde la cota 110m del muro exterior, una cúpula resuelta en acero y vidrio. (Solé, 2007, p. 15)

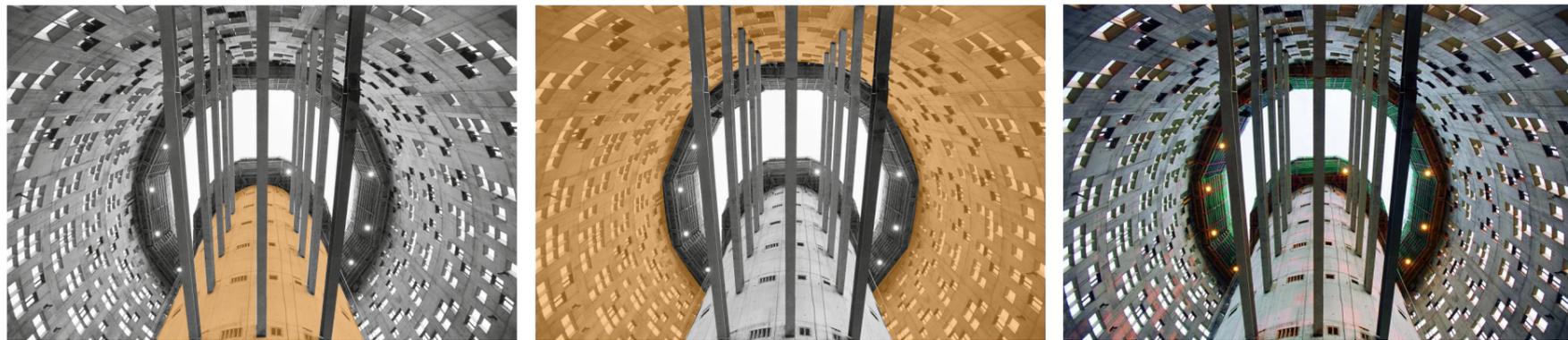
Figura 146
Composición de la estructura, Torre Agbar



- Muro exterior. El diseño particular de la fachada fue determinante a la hora de pensar en un sistema estructural debido a las múltiples aberturas que se necesitaban, por lo que para hacer posible este planteamiento se estableció que estas aberturas serían parte de un muro portante, es decir la estructura de los vanos en el muro de hormigón armado conforman la envolvente perimetral del edificio.

El muro en cuestión contempla una retícula teórica, de módulo cercano a los 92.5cm por 92.5cm, que cubre toda la fachada; sujeto siempre a esta retícula se disponen las aberturas de un modo aparentemente aleatorio. Es este hecho el que obliga a que el perímetro exterior sea un gran muro de carga de hormigón armado, ya que no permite el planteamiento de pórtico alguno. (Solé, 2007, p. 18)

Figura 147
Estructura de la Torre Agbar



Nota. Adaptado de Construcción de la Torre Agbar, (https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-8361/todo-sobre-la-construccion-de-la-torre-agbar/749673331_vigasforjadojpg?next_project=no), Copyright.

El muro exterior de carga varía su espesor conforme la torre va subiendo; en el subsuelo el muro cuenta con 50cm de espesor, desde la planta baja hasta los 110m de altura se establecen tres tramos; en el primer tramo el muro mantiene el espesor de su base de 50cm, en el segundo tramo el espesor disminuye a 40cm y en el tercer tramo el ancho del muro llega a los 30cm. Además, cuando el muro llega a una altura de 76.5m empieza a inclinarse para formar una curva hasta la planta 26.

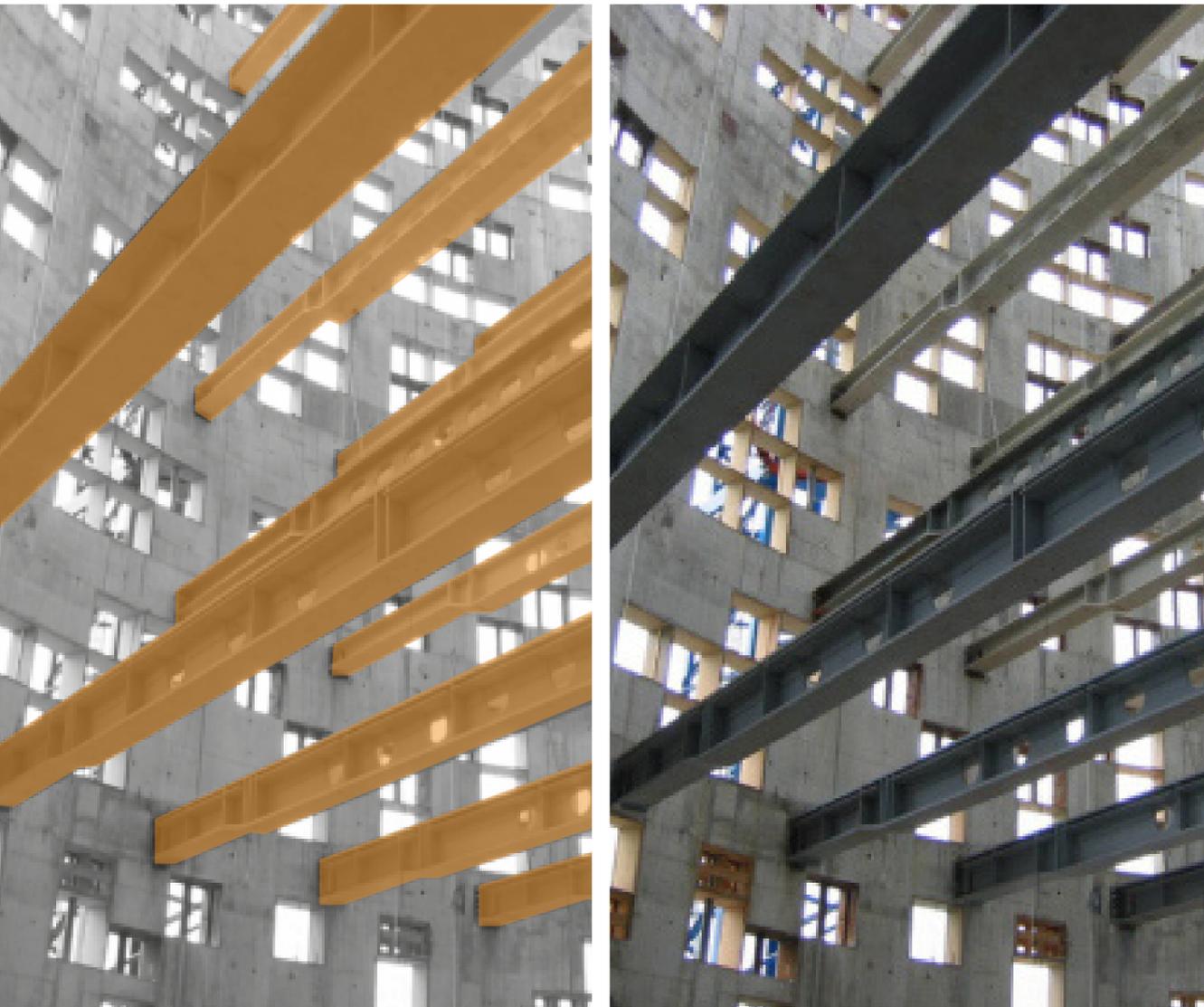
Esta estructura nada convencional del muro de hormigón, necesito de jaulas de armadura y la creación de unas crucetas especiales que permiten que las cargas se transmitan por un solo punto donde los vanos se disponen de manera diagonal, con el fin de establecer la continuidad de la transmisión de las cargas por la masa del hormigón.

- **Núcleo.** El núcleo también se resuelve en un muro portante de hormigón armado, que alcanza una altura de 132m sobre la cota de la calle y se cierra en sí mismo llegando a formar una cúpula en sus últimas plantas.

En planta, el núcleo de forma oval con dimensiones de 16.30m por 15.90m se encuentra desfasado hacia el grupo de ascensores del edificio, por lo que no existe una coincidencia de centros respecto al muro exterior de la torre.

El núcleo contiene la zona de servicio como se menciona anteriormente, el cual se conforma de paredes de hormigón armado "in situ", las cuales no ejerce ningún papel estructural, a diferencia de las paredes igualmente de hormigón armado que se encuentran frente al núcleo y que contienen el grupo de ascensores, las mismas que sí cumplen con función portante.

Figura 148
Estructura de la Torre Agbar, vigas



- **Forjados.** Los forjados de la torre hasta el piso veinticinco se apoyan en los muros de hormigón, estos “se constituyen con planchas plegadas sobre jácenas metálicas alveolares, con una distribución ortogonal en la zona de despachos y radiales solamente en la banda estrecha del lado este, donde se ubican los ascensores” (Crespo, 2005, p. 260).

Los forjados de los últimos cinco pisos son voladizos, se sujetan al núcleo central gracias a una estructura pos-tensada y no llegan a tener contacto con el muro perimetral que conforma la fachada.

- **Cúpula.** Se trata de una estructura metálica formada por un conjunto de 26 meridianas y 19 paralelas, formando una retícula que sus-

Nota. Adaptado de Construcción de la Torre Agbar, (https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-8361/todo-sobre-la-construccion-de-la-torre-agbar/250215082_muros3jpg?next_project=no), Copyright.

Figura 149
Estructura de la cúpula de la Torre Agbar



tenta los marcos de la carpintería que recoge al doble acristalamiento que cierra los huecos (Álvarez & Ramis, 2003, p. 41).

El proyecto de la cúpula ha sido revisado en múltiples ocasiones con la intención de atender a todos los condicionantes a que ésta debe dar respuesta, afectando a la perfilería escogida otras tantas veces. Finalmente, atendiendo fundamentalmente a criterios de facilidad y velocidad constructiva, la perfilería final ha resultado ser unas vigas armadas de sección tipo “I”, de 640x220mm, para los meridianos, y unos perfiles huecos rectangulares, de 180x260x8mm, para los paralelos. (Solé, 2007, p. 37)

Nota. Adaptado de Obuses de vidrio, por R. Vargas, 2004, (<https://arquitecturaviva.com/articulos/obuses-de-vidrio#g=1&slide=7>), Copyright.

3.3.5.2. Construcción

La Torre Agbar es una obra construida en hormigón armado tanto los muros portantes de la fachada y del núcleo, así como los muros de los ascensores, las paredes internas al núcleo y los forjados. Los materiales seleccionados para la cúpula fueron el vidrio y el acero también usado en las vigas de los forjados.

Para el recubrimiento de la fachada como ya se ha mencionado anteriormente se utilizaron chapas onduladas de aluminio, estructura de aluminio y lamas de cristal de distintos tratamientos.

El proceso de construcción de la torre se inició con la excavación del solar; para poder trabajar en el terreno arcilloso de la zona se tuvo que absorber toda el agua y bajar su ni-

vel freático empezada solo a 8 metros por debajo del nivel de la calle, proceso que duro alrededor de un año. Una vez listo el terreno se comenzó la cimentación de la torre y se construyó una losa de subpresión para poder comenzar con la construcción de los sótanos.

La torre se elevó planta por planta gracias al sistema de encofrado autotrepante y la obra se avanzaba en fases; primeramente, se subía el anillo interior para la construcción del núcleo, al mismo tiempo que el exterior para el muro perimetral y luego se construían los muros de los ascensores.

Con este sistema se subía un piso cada cinco días y a partir de la planta dieciocho en que la torre empezó a cerrarse se tardó siete días para subir un piso. A partir del piso veintiséis se paró la construcción del anillo exterior rea-

lizando los últimos cinco forjaos en voladizo.

La cúpula tuvo dos fases debido a su complejidad, primero se colocaron las veintiséis piezas de los 22m de altura iniciales; luego de hacer un premontaje a pie de obra se colocó el sombrero superior por partes.

Finalmente, una vez levantada la torre en toda su estructura de hormigón se procedió a la colocación de las ventanas y se revistió con aislante, placas onduladas de aluminio y con 59619 lamas de cristal.

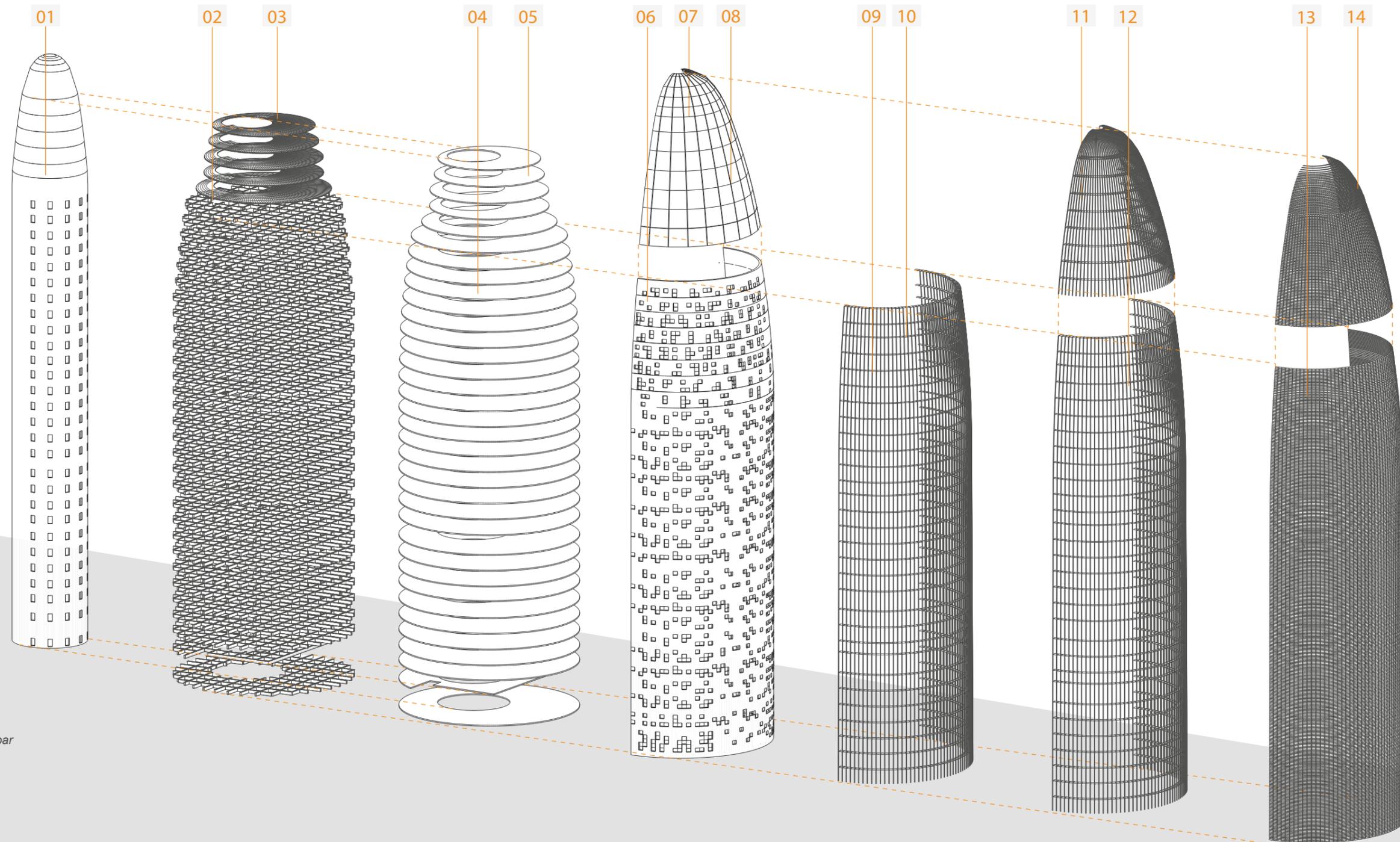


Figura 150
Composición de la Torre Agbar

- 01 Muro de hormigón armado
- 02 Viga metálica alveolares
- 03 Cables tensores
- 04 Losa steel deck
- 05 Losa en voladizo
- 06 Muro de hormigón armado
- 07 Vigas metálicas de cúpula, tipo I
- 08 Perfiles huecos rectangulares metálicos
- 09 Montantes y ménsulas de aluminio
- 10 Pasarela de mantenimiento
- 11 Montantes y ménsulas de aluminio en cúpula
- 12 Chapas onduladas de aluminio
- 13 Lamas de vidrio serigrafiado
- 14 Lamas de vidrio laminado en cúpula

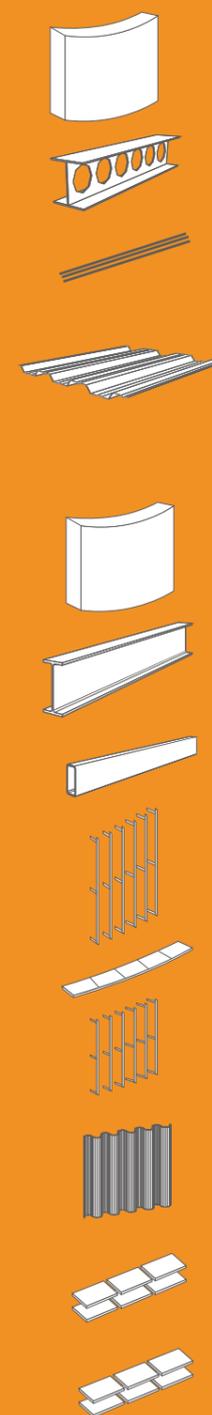
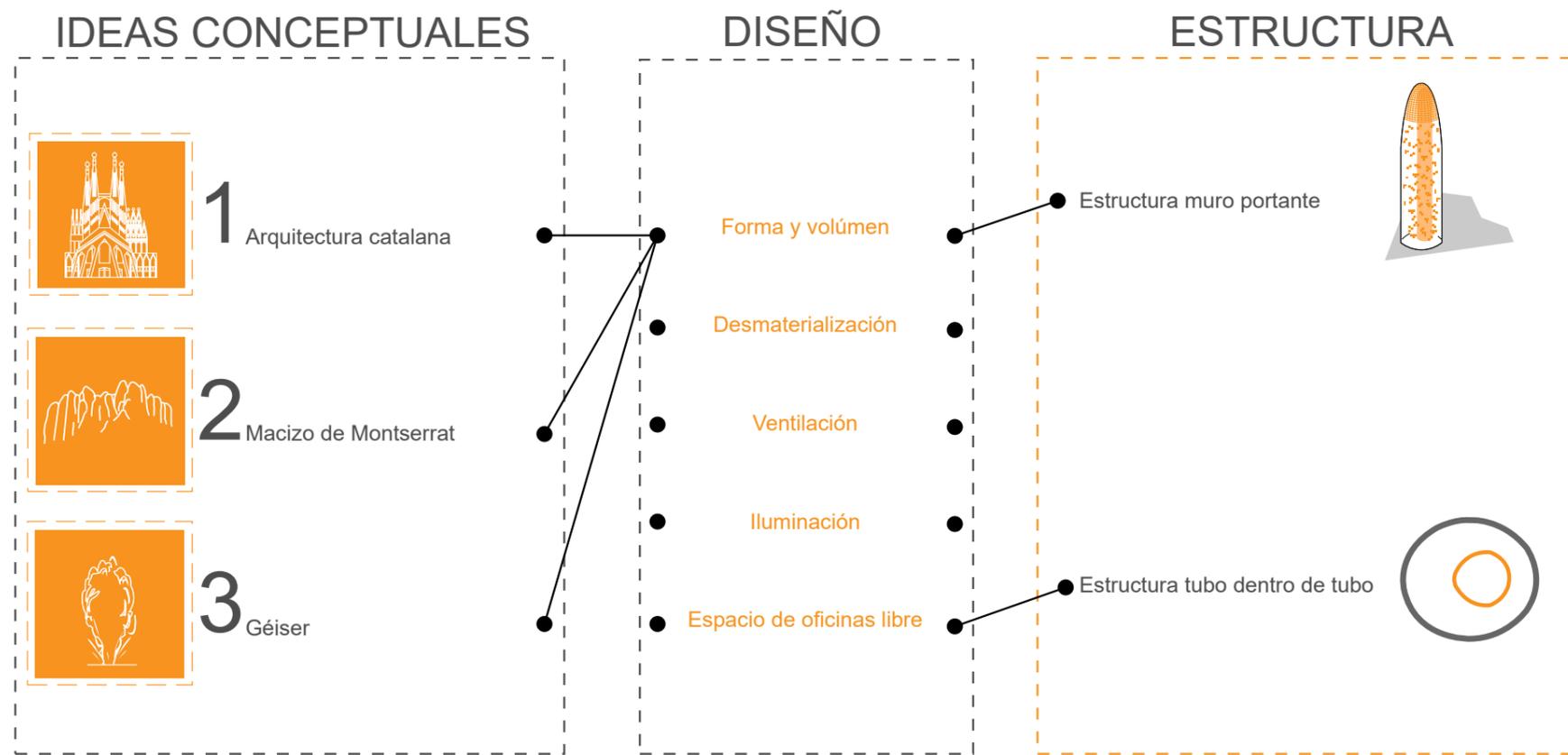


Figura 151
Relación entre las ideas conceptuales, el diseño y la estructura, Torre Agbar



3.3.5.3. Integración con el proyecto

La estructura de la Torre Agbar es clave para el desarrollo de la obra arquitectónica, la concepción de la forma poco usual de este edificio en altura necesita que se piense en la estructura en primera instancia para que la propuesta formal de diseño se pueda edificar y no varía drásticamente de su forma inicial.

La estructura de muro portante con todas sus perforaciones, es la que da paso a la forma y volumen del edificio. Que la fachada del edificio se haya resuelto mediante la estructura no quiere decir que responda a todos los criterios de diseño. En este proyecto se buscó evocar la idea de desmaterialización en el edificio, idea que claramente no la otorgaba el muro gris de hormigón armado, por lo cual la envolvente estructural se recubrió por más ca-

pas, incorporando el color para llegar a lograr esa ilusión, donde la estructura por sí sola no pudo.

En cuanto a la sostenibilidad que también fue parte principal del diseño, no se consiguió precisamente gracias a la estructura, si no a la doble capa en fachada que forma un colchón térmico entre las chapas onduladas de aluminio, las lamas de vidrio y los sensores inteligentes de temperatura que se encuentran en esta última, que hacen posible que el edificio reduzca considerablemente el consumo energético.

Lo que si posibilito la estructura fue el espacio libre y diáfano de las plantas, ya que gracias al sistema estructural de muros portantes se consiguió tener un espacio de oficinas abierto y continuo sin irrupción alguna.

Figura 152
Fotografías de la Torre Agbar



Nota. Adaptados de *Torre Agbar, Barcelona*, por R. Vargas, 2005, (<https://arquitecturaviva.com/obras/torre-agbar>), Copyright.

3.3.5.4. Valor compositivo y formal

No cabe duda que la estructura es una parte fundamental en la concepción global del edificio, la composición de muro perimetral con sus vanos y llenos, y la cúpula de cristal y acero crea la imagen de la torre, sin embargo, la envolvente estructural llega a pasar desapercibida cuando se la recubre tanto en el exterior como en el interior.

En un supuesto ejercicio, si se imagina que se quita toda la estructura vertical de la torre Agbar, la imagen del edificio prácticamente no cambiaría, si se visualiza desde el exterior no habría diferencia alguna ya que se seguiría viendo el recubrimiento en fachada de las chapas coloridas de aluminio y las lamas de cristal y por el interior el espacio seguiría siendo abierto y tampoco se llegaría a notar gran diferencia. Es así como a pesar de la particu-

laridad de esta estructura nada convencional, termina ocultándose, ya que nunca se tuvo la intención de exponerla, el fin siempre fue crear en el espectador desconcierto acerca de su sistema estructural; como menciona el propio arquitecto:

Las torres que edifico, en general, no afirman su solidez como principio fundamental, sino que más bien plantean preguntas sobre su sistema constructivo, sobre la naturaleza de su piel y su espacio interior. Siempre se han construido piezas verticales en la ciudad y su presencia es interesante en términos de poética y de composición urbana. Para mí plantean ese problema de la relación de la luz con la materia, así como el de la esencia constructiva en relación con su esencia estética. (Nouvel, 2003, p. 11)

3.4. Análisis comparativo entre el edificio 30 St Mary Axe y la Torre Agbar

Mas allá de los juicios positivos o negativos que puedan existir en torno a estos dos edificios que hoy en día son considerados como hitos de sus ciudades, el análisis crítico de esta investigación se enfoca únicamente en la estructura y su aportación en la composición arquitectónica, tomando los puntos analizados anteriormente que involucran directamente al diseño de los edificios para su comparación.

3.4.1. Ideas conceptuales

Los lineamientos del diseño para el edificio 30 St Mary Axe se plantean para dar solución a problemas del contexto, se toma conciencia sobre los factores principales que involucra construir un edificio de este tipo y se parte de estas consideraciones. Por otra parte, para la Torre Agbar el arquitecto desde un inicio plantea el diseño bajo el concepto metafórico de desmaterialización, guiándose en distintas

formas que trata de relacionarlas bajo una justificación del contexto, pero sin embargo estas ideas conceptuales no logran establecer una conexión con el entorno.

3.4.2. Forma y volumen

Es muy común que los dos edificios analizados sean comparados por la gran similitud de su forma y volumen y más aún cuando ambos son edificios contemporáneos, pero ciertamente los criterios arquitectónicos que están detrás de cada uno de sus diseños son muy distintos. La forma que toma el edificio 30 St Mary Axe es el resultado de un estudio cuidadoso de la implantación del edificio en el solar para su relación con el contexto y de la incidencia de las corrientes de viento sobre la masa del edificio en altura para establecer el volumen óptimo que toma ante este problema, involucrando desde aquí a la

estructura por la forma inusual resultante. En cuanto a la forma de la Torre Agbar, el diseño es arbitrario, se acredita únicamente por la intención del arquitecto quien se inspira en las referencias de Cataluña, como la montaña de Montserrat, la Sagrada Familia o un géiser; la forma y el volumen se conciben a partir de estas referencias y la estructura en este punto tiene que dar forma y solución a estas ideas.

3.4.3. Estrategias de diseño

Gran parte de las estrategias de diseño del edificio 30 St Mary Axe se relacionan con la estructura, esta se involucra desde los inicios del proyecto tomando un papel verdaderamente significativo, ya que se le confiere no solo una función técnica, sino también una función compositiva que se entrelaza con las estrategias para su materialización. En cambio, en la Torre Agbar las estrategias de dise-

ño no incluyen a la estructura como parte de su solución, en este caso la estructura no se contempla como un elemento que aporta o se relaciona con las estrategias del diseño del proyecto.

3.4.4. Estructura del espacio

Los espacios arquitectónicos en ambas edificaciones se determinan por la estructura, en el edificio 30 St Mary Axe el espacio libre en planta se logra gracias al sistema estructural, el cual no requiere de soportes internos, generando un espacio abierto que se desarrolla a partir del núcleo de columnas del edificio; lo mismo sucede en la Torre Agbar donde el espacio en planta lo define el muro perimetral y el muro que conforma el núcleo no concéntrico, dejando el resto del área libre para la distribución de los módulos de oficinas. Ambas plantas se caracterizan por generar espacio

libre alrededor del núcleo, sin embargo, los recorridos y la percepción del espacio difieren mucho entre sí, ya que internamente el espacio queda marcado por distintos aspectos, como la posición del núcleo estructural, la distribución de los módulos de trabajo, la posición de la circulación vertical, la forma de la planta, la altura de piso a techo, etc. Todo esto hace que por dentro los espacios de oficinas sean completamente diferentes pese a características comunes como la forma, el volumen, y el sistema estructural interno de núcleo.

3.4.5. Fachada

La fachada del edificio 30 St Mary Axe se compone del sistema estructural diagrid que se expone sin disimulo alguno, la cual forma la imagen del edificio como un volumen en torsión, gracias a que la estructura forma parte de la composición visual del proyecto. Para el

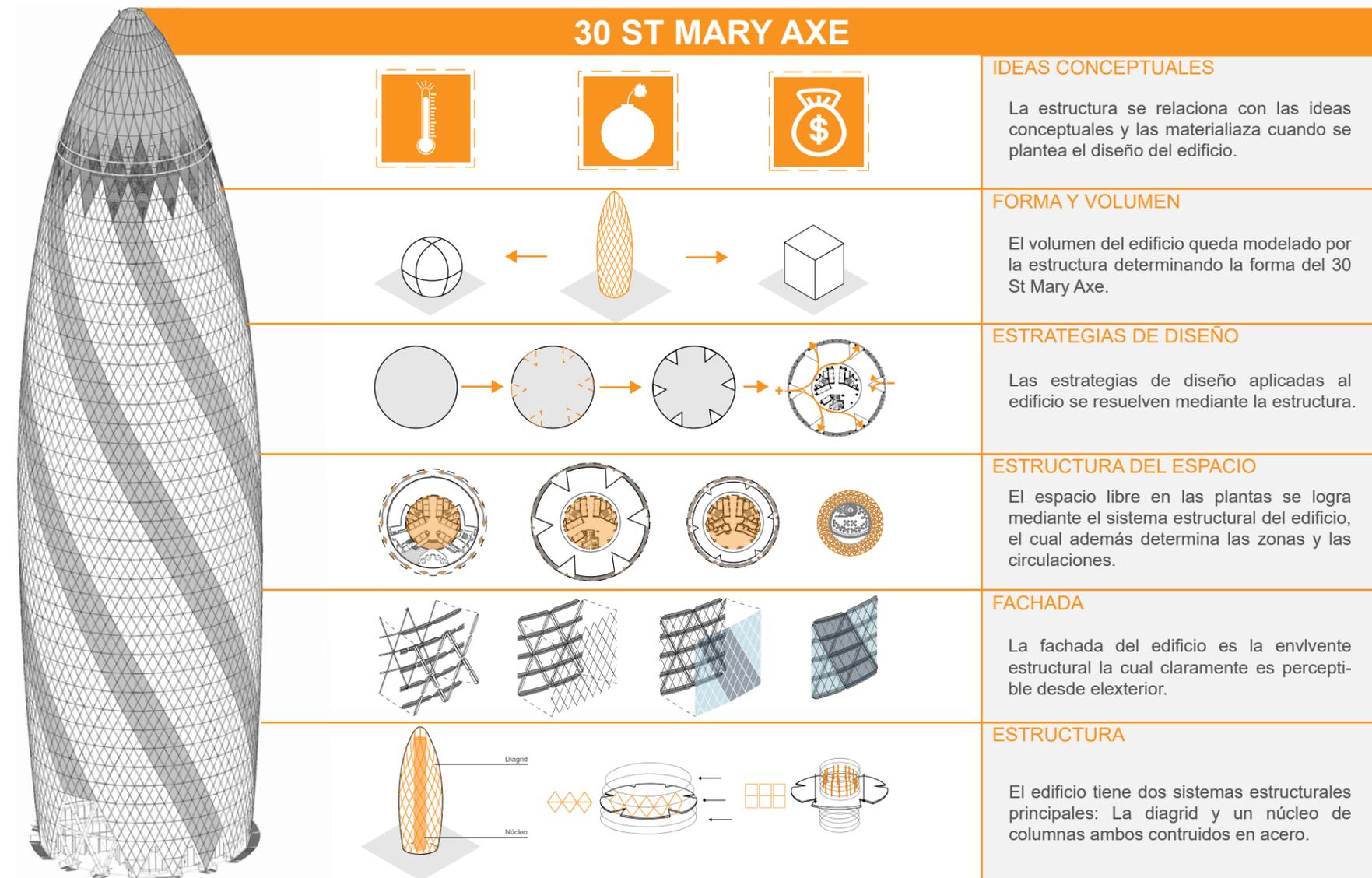
diseño del edificio desde un principio se adoptó una postura intencionada para dejar a la vista a la estructura, por el potencial compositivo que suma en el proyecto arquitectónico. En la Torre Agbar la estructura queda en último plano al ser imperceptible desde el exterior, la fachada del edificio cubre a la estructura por capas que llevaban a efecto las ideas de diseño, de las cuales la estructura claramente no es participe, ya que no contribuye con esta idea de desmaterialización que plantea el arquitecto, por ende, pasa desapercibida en la composición visual del proyecto.

3.4.6. Estructura

La estructura general del edificio 30 St Mary Axe la conforma la diagrid y el núcleo de columnas de acero, la estructura forma parte importante del diseño global del edificio y se conecta con todos los elementos del proyec-

to arquitectónico directa o indirectamente. La estructura de la Torre Agbar consiste en un sistema de muros portantes de hormigón armado, la estructura pese a ser singular, no se involucra de manera activa con los distintos elementos que forman parte del proyecto arquitectónico, por lo que no se puede hablar de algún aporte significativo a la composición del proyecto, más que de la forma que otorga al edificio y el espacio libre que genera en planta.

Figura 153
Cuadro comparativo del edificio 30 St Mary Axe y la Torre Agbar



El edificio 30 St Mary Axe y la Torre Agbar son un claro ejemplo de que para una forma y volumen similar, para el mismo programa arquitectónico, para el mismo concepto de espacio libre en planta, etc. existen múltiples posibilidades de sistemas estructurales que pueden dar solución a un mismo problema; como se menciona en el inicio de la tesis, hoy casi cualquier planteamiento formal puede ser resuelto gracias al avance en temas de construcción y estructura, pero más allá de dar soluciones de soporte y estabilidad, la estructura puede tomar un papel totalmente activo en el proyecto arquitectónico.

Ambos edificios a pesar de mantener una apariencia similar son dos obras muy distintas como ya se ha expuesto en el análisis previo, pero un aspecto indiscutible es que ambas estructuras resaltan por su innovación, sin embargo el papel que se le otorga a cada una

dentro del proyecto arquitectónico, hace que el edificio 30 St Mary Axe destaque sobre la Torre Agbar respecto al valor estructural; prueba de esto son los múltiples reconocimientos de carácter estructural que ha ganado el edificio 30 St Mary Axe, frente a los reconocimientos con que cuenta la Torre Agbar, como se pueden observar en la figura 153.

La importancia y consideración que se le confiere a la estructura queda subordinada bajo los criterios conceptuales que plantea cada arquitecto en el diseño del proyecto, donde se puede llegar a potencializar el papel compositivo de la estructura si esta se toma en cuenta desde las ideas iniciales, como es el caso del edificio 30 St Mary Axe, más no si la estructura se piensa solo como una solución técnica, como es el caso de la Torre Agbar.

Toda la complejidad y maestría estructural

con que se construyó la Torre Agbar queda obsoleta con las múltiples capas de recubrimiento que se le agrega, las mismas que hacen imposible tener una lectura clara de la estructura. Ciertamente esta no posee ningún valor en la composición visual del edificio, reduciéndose únicamente a una solución técnica, y pese a que, la idea del arquitecto fue crear desconcierto sobre la estructura del edificio, para cualquier observador la estructura le puede llegar a resultar indiferente más que desconcertante, por el papel que esta tiene en el diseño del proyecto.

La edificación de la torre se resuelve con una envolvente estructural, que en su ironía es envuelta; pero aquí la estructura no se recubre como se vio en la arquitectura romana, en donde, si bien, la estructura real se ocultaba, la obra se revestía por pilares que aunque no cumpliesen una función portante, estos toma-

Figura 154
Premios otorgados al edificio 30 St Mary Axe y la Torre Agbar

30 St Mary Axe			
Imagen	Arquitecto	Premios y reconocimientos	Año
	Norman Foster	Premio AR / MIPIM Future Project	2003
		Best British Innovation	2003
		European Steel Structures Award	2003
		Desarrollo sobresaliente del año	2003
		Premio Emporis Skyscraper	2003
		Premio Dutch Steel	2004
		Wallpaper Design Awards	2004
		Mejor desarrollo de oficinas en el centro de Londres	2004
		RIBA Stirling de Arquitectura	2004
		Premio especial de acero	2004
		Mención de honor (The International Highrise Award)	2004
		Premio de Confianza Cívica	2006
Premio al mejor edificio de la Bienal de Arquitectura de Londres	2006		
CTBUH Awards	2013		

Torre Agbar			
Imagen	Arquitecto	Premios y reconocimientos	Año
	Jean Nouvel	Premio Emporis Skyscraper (Plata)	2004
		Premio International Highrise	2006
		Premio pritzker	2008
		Green Building Award de la Comisión Europea	2011

ban valor por su aporte compositivo; o como en la arquitectura bizantina, donde la estructura no se exponía directamente, sino que se diseñó de manera tal, que esta aparenta algo que no es, pero que a la final está ahí a la vista de todos, concebida bajo una lógica estructural que aporta al proyecto; más bien el recubrimiento que tiene la Torre Agbar guarda similitud con la arquitectura del Rococo donde todas las capas que se le da a la estructura la hacen irreconocible, anulando cualquier aporte compositivo al proyecto.

Por otra parte al igual que en la arquitectura gótica o en la arquitectura griega donde esta idea de arquitectura es la estructura misma, la cual se expone como la imagen de las edificaciones, tomando un valor compositivo en su máxima expresión, la estructura del edificio 30 St Mary Axe también habla por sí sola

como protagonista de la obra arquitectónica; esta exposición de la envolvente estructural es claramente el reflejo de la importancia y el valor que se le dio desde un inicio en las intenciones de diseño, por lo que este proyecto es un buen ejemplo del potencial compositivo de la estructura en la arquitectura.

Dicho todo esto Independientemente de cuál sea la solución estructural de los edificios analizados, la estructura se vuelve relevante en la medida en que esta refuerza las ideas del proyecto; de esta manera el valor de la estructura en la composición arquitectónica dependerá de las decisiones del proyectista y su reflexión de hasta qué punto la estructura puede llegar a enriquecer la obra arquitectónica y como conseguir que esta se relacione con todos los aspectos del proyecto para llegar a conformar un todo coherente.

Conclusiones

La investigación realizada es un aporte teórico sobre el potencial compositivo que enriquece la arquitectura, mediante la ilustración y análisis de obras arquitectónicas que llevan a la reflexión sobre el papel estructural, siendo así un posible texto de referencia de ideas para proyectos arquitectónicos que brinda una nueva perspectiva sobre la manera técnica con que se puede llegar a percibir a la estructura, y está enfocado principalmente a estudiantes de arquitectura que deseen ampliar su conocimiento sobre el diseño estructural.

En la tesis se analizó el rol de la estructura en la arquitectura a través de la historia desde un enfoque compositivo, para poder comprender que no se puede enmarcar a la estructura en un discurso puramente técnico, ya que más allá de ser un elemento que da soporte y estabilidad a un proyecto, también puede ser

un elemento versátil que toma valores expresivos, ornamentales, funcionales, formales, etc., que aportan al resultado final de la obra arquitectónica.

El análisis de cuatro estrategias de diseño estructural, permitió exponer como la estructura más que ser un medio al servicio de una idea, se convierte en la idea misma de la arquitectura, de aquí la importancia de incluir a la estructura como un elemento activo en el diseño para producir un aporte significativo en la composición de la obra arquitectónica.

Mediante el análisis y contraste del edificio 30 St Mary Axe y la Torre Agbar se reafirma el valor compositivo que aporta la estructura a la arquitectura, puesto que, independientemente del enfoque que cada arquitecto asuma en el diseño, la estructura se vuelve

relevante en la medida en que, desde un inicio se integra con las ideas conceptuales y logra relacionarse con el resto de elementos para llegar a materializar el proyecto con éxito.

La estructura no es un componente neutral de la arquitectura, existen un sin número de maneras de enriquecer un proyecto arquitectónico con estructura, ya que esta no solamente puede seguir la forma, sino que también puede llegar a dar forma.

Recomendaciones

Se recomienda a los estudiantes de arquitectura o arquitectos:

Incorporar de manera activa a la estructura en el diseño arquitectónico, de esta manera se deja de percibir a los elementos estructurales como condicionantes técnicos a cumplir y se plantean como elementos compositivos que aportan al proyecto arquitectónico.

Cambiar la percepción común que se tiene sobre la estructura como un componente únicamente técnico en el proyecto, con el propósito de que reflexionen y se involucren más con las posibilidades de la estructura en la composición arquitectónica.

Para el diseño estructural del proyecto, trabajar de la mano con los ingenieros, involucrándose en todo el proceso para encaminar de manera correcta las ideas conceptuales y

juntos poder llevar a cabo la realización viable de la obra arquitectónica.

A la facultad de arquitectura se recomienda:

Generar un nuevo enfoque sobre el potencial de la estructura en la composición arquitectónica en las materias de construcciones, para despertar el interés de los estudiantes sobre temas estructurales que pueden ayudar y aportar ideas a los proyectos académicos.

Bibliografía

- Ábalos, I., & Herreros, J. (2000). *Técnica y arquitectura en la ciudad contemporánea*. Editorial Nerea.
- Addis, B. (2007). *3000 years of design engineering and construction*. Phaidon Press.
- Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D., & Williams, C. (2014). *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge.
- Alonso, J. (2005). *Introducción a la historia de la arquitectura de los orígenes al siglo XXI*. Editorial Reverté, S.A.
- Álvarez, Á., & Ramis, J. (2003). Torre Agbar, en Barcelona. *Revista de obras públicas* Nº 3.435, 39-51.
- Aroca, R. (1999). *¿Qué es estructura?*. Instituto Juan de Herrera.
- Arup. (30 de Julio de 2009). *30 St Mary Axe*. Arup: <https://www.arup.com/projects/30-st-mary-axe>
- Azagra, D., & Bernabeu, A. (2012). La estructura de las formas libres. *Informes de la Construcción Vol. 64*, 133-142.
- Azizi, M., & Zohreh, T. (2015). The Role of Structure in Creating Architectural Space. *Current World Environment, Vol. 10*, 131-137.
- Bango, I. (1989). *Alta Edad Media de la tradición Hispanogoda al Románico*. SILEX.
- Bassegoda, J. (1984). *Historia de la arquitectura*. Edita mexicana, S.A.
- Beghini, L. (2013). *Connecting architecture and engineering through structural topology optimization*. Engineering Structures.
- Benévolo, L. (1979). *Historia de la arquitectura moderna*. Gustavo Gili.
- Bernabeu, A. (2007). *Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid].
- Boake, T. (s.f.). *Diagrid Structures: Innovation and Detailing*. School of Architecture, University of Waterloo.
- Borja, J. (2010). *Luces y sombras del Urbanismo de Barcelona*. Editorial UOC Universidad Oberta de Catalunya.
- Bssegoda, J. (1984). *Historia de la arquitectura*. Edita Mexicana S.A.

Castex, J. (1994). *Renacimiento, Barroco y Clasicismo*. Akal.

Catalán, Z. (2008). *A propósito de las bóvedas de crucería*. Anales de Historia del Arte.

Cervilla, A. (2015). *El lenguaje de la estructura: Mies van der Rohe y la construcción con acero y hormigón* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid].

Charleson, A. (2007). *La estructura como arquitectura: Formas, detalles y simbolismo*. Editorial Reverté, S.A.

Ching, F. K. (2009). *Manual de estructuras ilustrado*. Gustavo Gili.

Choisy, A. (1997). *El arte de construir en Bizancio*. Instituto Juan Herrera.

Clark, R., & Pause, M. (1997). *Arquitectura: temas de composición*. Gustavo Gili.

Collins, P. (1977). *Los ideales de la Arquitectura Moderna, su evolución (1750-1950)*. Gustavo Gili.

Costes, M. (2004). *Elogio de Constantinopla*. Universidad de Castilla La Mancha.

Crespo, I. (2005). *Control gráfico de formas y superficies de transición*. Universidad Politécnica de Catalunya

Curcio, L. (1968). *Estudios y reflexiones sobre estructuras medievales y equilibrio de la catedral gótica de Reims*. Mac Gaul.

Diez, G. (2005). *Diseño estructural en arquitectura: introducción*. Nobuko.

Duggett, T. (2010). *Gothic Romanticism: Architecture, Politics, and Literary Form*. Palgrave Macmillan.

Engholm, I., & Salamon, K. (2017). Design thinking between rationalism and romanticism. *Artifact Vol. 4*, 1-18.

Escrig, F., & Perez, J. (2004). *La modernidad del gótico. Seis puntos de vista sobre la arquitectura medieval*. Universidad de Sevilla.

Farshid, M. (2008). *The Function of Ornament*. Actar, Harvard Graduate School of Design.

Fernández, L. (2003). Tipos de oficinas. *AV Monografías N° 103*, 98-105.

Fernández, L. (2004). España 2004. *AV Monografías N° 105 -106*, 180-183.

Fernández, L. (2005). España 2005. *AV Monografías N° 111 -112*, 46-55.

Fernández, L. (2013). Norman Foster en el siglo XXI. *AV Monografías N° 163 -164*, 228-235.

Forteza, T. (2015). *Desmaterialización de la envolvente estructural contemporánea* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid].

Foster + Partners. (23 de Febrero de 2013). *30 St Mary Axe*. Obtenido de Foster + Partners: <https://www.fosterandpartners.com/projects/30-st-mary-axe/>

Frampton, k. (1993). *Historia de la arquitectura moderna*. Gustavo Gili S.A.

Freiberger, M. (1 de Marzo de 2007). *Edificios perfectos: las matemáticas de la arquitectura*

moderna. Obtenido de + plus magazine: <https://plus.maths.org/content/perfect-buildings-maths-modern-architecture>

Garciani, A. (2000). *La técnica de la arquitectura medieval*. Amparo.

Garciani, A. (2001). *La técnica de la arquitectura medieval*. Universidad de Sevilla Secretariado de publicaciones.

García, G., & López, V., (2008). *Torre Agbar el interior*. Ediciones UPC.

Giedion, S. (2009). *Espacio, tiempo y arquitectura*. Reverté, S.A.

Granda, M., Chiarella, M., & Veizado, M. (2017). Diseño orientado a la optimización en envolventes laminares de flexión activa. *Arquitecno*, 163, 48-57.

Hegel. (1818). *Lecciones sobre la Estética. Tercera Parte, Primera Sección, La Arquitectura*. Akal.

Heyman, J. (1999). *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Instituto Juan de Herrera.

Heyman, J. (2011). *Teoría básica de las estructuras*. Reverté, S.A.

Honour, H., & Fleming, J. (2004). *Historia mundial del arte*. Akal S.A.

Instituto nacional de antropología e historia, s. d. (2017). Conversaciones con Eugène Viollet Le Duc y Prosper Mérimée. *Revista de conservación*.

Ito, T. (2007). The Spide's Web. *Revista Domus N° 906*, 37.

- Jean, N. (2005). *Ateliers Jean Nouvel*. Torre Agbar: <http://www.jeannouvel.com/projets/tour-agbar/>
- Jantzen, H. (1970). *La arquitectura Gótica*. Nueva Visión.
- Kahan, L. (1957). *Spaces Order and Architecture*. LATOUR, A.
- Kostof, S. (2009). *Historia de la arquitectura*. Vol 3. Alianza Editorial.
- Laugier, M.-A. (1999). *Ensayo sobre la Arquitectura*. Akal.
- López, I. (2014). La aportación estructural del Crystal Palace de la Exposición, Universal de Londres 1851. *Rita* N° 2, 76-83.
- Macdonald, A. J. (2001). *Structure and Archi-*
- tecture*. Reed Educational and Professional Publishing Ltd.
- Manterola, J. (2005). La estructura resistente en la arquitectura actual. *Informes de la Construcción*, Vol. 57, N° 499-500, 9-35.
- Martín, J. (1991). Arquitectura y Romanticismo: El pensamiento arquitectónico en la España del XIX. *BSAA*, N° 57, 556-558.
- Massey, J. (15 de Octubre 2013). *Risk Design*. Obtenido de sitio web de The Aggregate: <http://we-aggregate.org/piece/risk-design>
- Mateos, J. (2014). *Persistencia de Santa Sofía en las mezquitas otomanas de Estambul*. *Símbolos XV XVII*. Mecánica y construcción. ACCI.
- Medina, J. (2013). *La luz gótica. Paisaje religioso y arquitectónico de la época de las cate-*
- drales*. Hispania Sacra, LXV.
- Meyer, T. (2016). The Emergence of the Diagrid - It's All About the Node. *International Journal of High-Rise Buildings*, Vol 5, N 4, 293-304.
- Molina, D. (2011). La envolvente estructural como nuevo proceso de diseño y construcción. *Alzada* 103, 62-69.
- Moix, L. (2010). *Arquitectura milagrosa*. Barcelona: Anagrama S.A.
- Morales, C. (2018). Diseño y desarrollo de patrones de la forma de una tenso-estructura. *Revista de Arquitectura*.
- Moussavi, F. (2012). 30 St. Mary Axe. *Harvard Design Magazine*.

- Munro, D. (2016). Swiss Re's Building, London. *ArchiDiAP*, 36-43.
- Murcia. (1922). Escritos, diálogos y discursos. *Revista Frühlicht* N° 1, 21-24.
- Navascués, P. (1987). La formación de la arquitectura neoclásica. En: "La época de la Ilustración". Madrid: Espasa-Calpe.
- Nouvel, J. (2003). *Jean Nouvel, 1994-2002*. Madrid: El Croquis Editorial.
- Núria, C. (29 de Agosto de 2018). Columnas de la sala hipóstila, templo de Karnak. Obtenido de National Geographic: https://historia.nationalgeographic.com.es/a/sheshonq-i-faraon-que-conquistó-jerusalén_8678#_=_
- Ortega, F. (1992). La construcción en Egipto. *Revista de Edificación*, 65.
- Ortega, F. (1992). La construcción en Egipto. *Revista de Edificación*.
- Pérez, J. (2012). Nuevas especies de espacios. Scielo.
- Philip, M., & Sigmund, O. (2004). *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*. New York: Verlag Berlin Heidelberg.
- Poblador, M. (s.f.). El Neogótico y el Neomedieval: nostalgia del pasado en la era de la industrialización. Universidad de Zaragoza.
- Portella, U. (2006). *De lo digital en arquitectura*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Puebla, J. (2004). Sobre la innovación expresiva del proyecto contemporáneo. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Querin, O. (2010). Topology optimization of truss-like continua with different material properties in tension and compression. Springer.
- Roth, L. M. (1999). *Entender la arquitectura*. Gustavo Gili, S.L.
- Rigotti, A. (2014). *Estructura, espacio y envolvente: autonomía y especificidad de medios*. Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Rosario.
- Russell, J. (2004). En una ciudad reacia a las torres, 30 St Mary Axe, la 'insinuación imponente' de Foster & Partners, es un gran éxito ecológico. *Architectural Record*, 218-227.
- Sarkisian, M., & Beghini, A. (2018). *Applications of Structural Optimization to Architectural Design*. Scientech Publisher.

Schopenhauer, A. (2004). *Lecciones sobre metafísica de lo bello: Sobre la Arquitectura y el arte de canalizar las aguas*. Universidad de Valencia.

Schultes, A. (3 de Junio de 2017). *Schultes Frank Architekten*. Obtenido de Schultes Frank Architekten: https://www.schultesfrank.de/portfolio_page/krematorium-baumschulenweg/

Schulz, C. (1980). *Existencia, espacio y arquitectura*. Blume.

Schulz, C. (2001). *Arquitectura Occidental*. Gustavo Gili.

Scott, G. (1970). *La Arquitectura del Humanismo*. Barral.

Solé, J. (2007). *Proyecto y ejecución de la es-*

tructura de la torre agbar. Universidad Politécnica de Catalunya.

Summerson, J. (1984). *El lenguaje clásico de la Arquitectura*. Gustavo Gili

Tavernor, V., & Gunter Gassner, G. (2010). Consecuencias visuales del plan: Gestión del horizonte cambiante de Londres. *Ciudad, cultura y sociedad Vol. 1*, 99-108.

Heyman, J. (1995). *Estructuras de fábrica: Teoría, historia y restauración*. Ministerio de obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente.

Toca, A. (2015). Arquitectura e ingeniería. *Casa del tiempo N° 23-24*, 36-40.

Tomas, A., & Marti, P. (2009). *Shape and size optimization of concrete shells*. Proceedings of the IASS Symposium.

Torroja, E. (2010). *Razón y ser de los tipos estructurales*. Edición revisado por José A. Torroja. CSIC.

Villate, M. (2011). *Estructuras no convencionales en arquitectura*. Universidad Nacional de Colombia.

Viollet le Duc, E. (1996). *La construcción medieval*. Instituto Juan de Herrera.

Viollet le Duc, E. (2007). *Conversaciones sobre la Arquitectura*. Consejo General de la Arquitectura Técnica de España.

Vitruvio. (2007). *Los diez libros de arquitectura*. Iberia, décima edición .

Wölfflin, H. (1986). *Renacimiento y Barroco*. Ediciones Paidós.

Worringer, W. (1967). *La esencia del gótico*. Nueva Visión.

Vázquez, F. (s.f.). b720. *Agbar*: <http://b720.com/es/portfolio/torre-agbar/>

Zevi, B. (1981). *Saber ver la arquitectura*. Poseidon.