

Claves del construir arquitectónico

TOMO I. PRINCIPIOS

José Luis González
Albert Casals
Alejandro Falcones

Claves del construir arquitectónico

TOMO I. PRINCIPIOS

2ª edición revisada conforme al CTE

Índice

Presentación de la segunda edición	7
Introducción general a los tres tomos	9
TOMO I. Principios	13
Introducción	15
I. Adecuación del espacio	17
1. Uso, delimitadores y estructura	19
2. El primer embate gravitatorio	32
II. Adecuación del ambiente	51
Natural	
3. Agua	53
4. Calor y frío	66
5. Luz	82
Artificial	
6. Contaminación	90
7. Ruido	94
III. Integridad	109
Personas	
8. Seguridad de uso	111
Personas y edificio	
9. El fuego	114
10. Los embates horizontales	122
Edificio	
11. El paso del tiempo	128
IV. Producción	145
12. Técnicas del construir arquitectónico	146
13. La conformación de los materiales	153
14. La conformación del edificio	168
V. Estética	183
15. Técnicas de producción y conveniencia estética	186
16. Razones prácticas (uso y duración)	
y conveniencia estética	202
Bibliografía	218
Identificación fotográfica	221
Agradecimientos, biografías	224

NOTA A LOS TRES TOMOS:

Las referencias cruzadas a los temas de los diferentes tomos se indican con el número del tomo (en romanos), seguido del número del tema y subtema (en arábigos). Así, III-1.2 hace referencia al tomo III, tema 1, subtema 2.

Presentación de la segunda edición

Este libro estudia gran cantidad de temas tratados en otras obras especializadas, pero sin la intención de repetir nada de lo ya dicho ni hacer una simple reagrupación de informaciones. Su objetivo es exponer el saber constructivo básico necesario para participar profesionalmente en el mundo de la Arquitectura, pero, y esto es lo fundamental, con una nueva manera de estructurarlo y desarrollarlo mucho más acorde con su realidad actual.

El punto de partida se encuentra en la experiencia acumulada por los autores, arquitectos en ejercicio y profesores de Construcción Arquitectónica desde hace más de veinte años, y, especialmente, en las conclusiones de sus investigaciones más importantes.¹

Dos frases extraídas de ellas pueden presentarse aquí como claves para entender la filosofía básica de todo el empeño. La primera justifica el esfuerzo de escribir el texto:

“La simple observación de los apuntes escolares y de los libros habitualmente manejados por los estudiantes y los profesionales permite comprobar que el saber constructivo, salvo escasas excepciones, sigue sin haber encontrado la manera de estructurarse según las mentalidades y actividades del arquitecto. En nuestro país, además, la pervivencia de la tradición que prefiere la traducción a la redacción impide una reflexión colectiva sobre nuestros procedimientos constructivos”.²

La segunda, el modo como se ha escrito: “El hecho de que los edificios y la ciudad estén implacablemente sometidos a las leyes de la física y la economía diferencia cada vez más a la arquitectura del resto de las artes, y lleva

a que el equilibrio entre requerimientos potencialmente divergentes tales como expresión y función o poesía y eficacia sea una meta de dificultad creciente. Sin embargo, a pesar de que gran parte del entramado teórico arquitectónico intenta neutralizar esas divergencias, sigue sin existir un cuerpo de doctrina que consiga su integración efectiva, debido esencialmente a la pervivencia de una tradición teórica que arranca de la obra escrita de Vitruvio (...), que a partir del siglo XVIII genera y consolida una disgregadora estructura teórica tripartita”.³

El objetivo de este libro es aportar una nueva manera de organizar el saber constructivo con relación a la teoría global de la arquitectura que supere ese ya añejo esquema disgregador en tres ramas autónomas. El resultado final que se busca es un compendio que aporte métodos y saberes que eviten los conflictos entre la eficacia y la poesía de nuestra arquitectura, aquí y ahora, en todo lo que depende de su parte material.

El método para conseguirlo se basa en el estudio de los elementos constructivos (tomos II y III) y de los principios que han de orientar su concepción y realización (tomo I).

Una buena parte de los objetivos concretos que se deducen de esos principios son de obligado cumplimiento por las legislaciones de los diferentes países con tal de defender los intereses de los usuarios. Otra parte de los objetivos, como la conveniencia estética, en general, quedan al margen de la normativa.

En España, la ley que regula todo el proceso de edificación es la LOE (Ley de Ordenación de la Edificación) de 1999 y se concreta con el Código Técnico de la Edificación (en adelante CTE) en vigor desde 2006 y 2007.

Esta **segunda edición** incorpora en sus textos los profundos cambios que ha sufrido el cuerpo normativo desde la primera edición de 1997, por lo que se han sustituido todas las referencias a las derogadas NBE por las nuevas que define el CTE, o las también derogadas NTE por las correspondientes UNE, en el caso de que existan. Sin embargo, la estructura general de la obra no sufre ningún cambio debido a que ya se concibió originalmente según el esquema de **requisitos-exigencias-prestaciones**. Con todo, conviene hacer algunas precisiones sobre estos tres términos, que el CTE ha convertido en normativos.

La LOE indica que para garantizar la seguridad de las personas, el bienestar de la sociedad y la protección del medio ambiente, los edificios deberán proyectarse, construirse, mantenerse y conservarse de tal forma que se satisfagan los **requisitos** básicos de la edificación, que los agrupa en tres categorías: funcionalidad, seguridad y habitabilidad.

Los correspondientes a la funcionalidad son la utilización y accesibilidad a los edificios. Las normativas que los regulan al detalle dependen en general de administraciones autonómicas o locales. Los de seguridad (estructural, en caso de incendio y de utilización) y de habitabilidad (higiene, salud y medio ambiente, protección del ruido y ahorro de energía y aislamiento térmico) quedan regulados por el CTE.

Por **exigencias** básicas, el CTE entiende las características genéricas, funcionales y técnicas de los edificios que permiten satisfacer los requisitos básicos de la edificación.

El CTE define la **prestación** como el conjunto de características cualitativas o cuantitativas del edificio, identificables objetivamente, que determinan su aptitud para cumplir las exigencias básicas. Como se ve, el significado de prestación no difiere del que se utiliza cuando hablamos de que las prestaciones del ordenador o automóvil de una determinada marca superan las del de otra marca. La prestación no es un concepto abstracto, sino que es propio de un objeto o edificio determinado. Ahora bien, la prestación de un edificio depende de su infinidad de subsistemas, elementos y materiales, de manera que es un concepto que se aplica a éstos, así, por ejemplo, se habla de prestaciones acústicas de un tabique concreto.

Obviamente, el concepto de exigencia es diferente aunque, a pesar de ello, en muchas ocasiones se intercambia con el de prestación. Una exigencia es una característica exigible que un edificio o alguna de sus partes deberá cumplir una vez construido por medio de sus prestaciones, que pueden ser superiores si lo desea el promotor.

El CTE aplica explícitamente el concepto de exigencia en los niveles más generales del edificio, pero cuando se llega al nivel de los elementos, depende del documento concreto (téngase en cuenta que en el CTE han intervenido equipos de redacción muy diversos). En unos casos se sigue usando el concepto de exigencia para un elemento, fachada o tabique, y en otros se utiliza el concepto, menos relacionado con algo exigible, de parámetros característicos.

En los tres tomos del presente texto se utiliza la denominación exigencia para todos los niveles, en especial el de los elementos. El concepto de requisito, tal como hace el CTE, se reserva para niveles más generales aunque sin coincidir totalmente con él. Por encima de los requisitos se encuentran los principios, tal como se definen en la siguiente introducción a los tres tomos.

¹ González Moreno-Navarro, José Luis, *El Legado oculto de Vitruvio*, Alianza Editorial, Madrid, 1993; Casals Balagué, Albert, *El arte, la vida y el oficio de arquitecto*, Alianza Editorial, Madrid, 2001.

² González Moreno-Navarro, José Luis, *ibídem*, p. 283.

³ González Moreno-Navarro, José Luis, *ibídem*, contraportada. A partir de una declaración razonable de los objetivos de la Arquitectura ("*firmitas, utilitas et venustas*"), en los tratados académicos de los siglos XVIII y XIX se llegó a una estructura de los medios para alcanzarlos formada por tres ramas estancas entre sí (puesta en obra, distribución, decoración) que condujo a una (no superada todavía) concepción desintegrada de los conocimientos arquitectónicos, con un saber constructivo ensimismado y ajeno a los intereses de la poética, un saber formal-compositivo ignorante de su realidad material y con ambos saberes alejados de las razones del uso. Si bien la revolución ideológica del movimiento moderno del primer tercio del siglo XX mejoró algo el panorama, en realidad no consiguió superar este lastre del academicismo dieciochesco y decimonónico.

Introducción general a los tres tomos

Los principios del construir arquitectónico

La finalidad básica de construir edificios (y sus diversas posibles agregaciones) es facilitar aquellas actividades humanas que se desarrollan mucho mejor en espacios bien organizados y dotados de un ambiente controlable que en espacios y ambientes naturales. Son actividades de todo tipo, de protección, como defenderse de intrusos o tempestades, íntimas o privadas, como dormir o amar, sociales o públicas, como enseñar, parlamentar o comunicarse con la divinidad.

Que un artefacto contenedor de espacios ambientados, es decir, un edificio, facilite e incluso potencie el desarrollo de esas actividades, permite calificarlo de útil. Lógicamente, alcanzar esta utilidad pasa a ser un objetivo inexcusable de quien quiera construir bien.

Ahora bien, estos artefactos y sus agregaciones, con su presencia ineluctable, llegan a configurar el entorno existencial de las personas de una manera tan intensa y envolvente que quedan sometidos, ineludiblemente, a las exigencias estéticas, significativas, simbólicas y comunicativas inherentes a la naturaleza humana. Si el construir satisface las razones de la utilidad práctica y a la vez da la respuesta conveniente a estas exigencias que la trascienden y que podemos considerar como propias del arte, se convierte en un construir arquitectónico, o, sencillamente, en arquitectura.

La arquitectura, especialmente la contemporánea, se diferencia del arte puro, sea la pintura o la escultura, porque su justificación reside en que el uso de sus espacios facilita las actividades humanas. Y se diferencia de la mera construcción en que participa intensa e inevitablemente de las exigencias propias del

arte. Ambas son condiciones necesarias, pero ninguna por sí sola suficiente. Un edificio emocionante, pero inutilizable, no es una obra de arquitectura, como mucho, una escultura visible. Un edificio totalmente útil pero sin un mínimo de poesía, tampoco.

Pero la justificación por el uso no es el único hecho diferenciador de la arquitectura. La citada presencia ineluctable de sus obras es un factor clave distintivo del resto de las artes. Ninguna obra de escultura, pintura, literatura o música nos impone implacablemente su presencia como lo hacen las obras de arquitectura. Una novela mediocre no obliga a pasar de la segunda página, una sinfonía requiere la voluntad del oyente, o una pintura, por grande que sea, es un objeto mueble. Una obra de arquitectura, enorme e inamovible, lo es con total independencia de nuestros deseos y capacidades durante toda su vida, en general, bastante más larga que la de cualquiera de nosotros. Es una razón poderosa para poder afirmar que, si bien su utilidad interesa especialmente a sus usuarios, su conveniencia estética es una exigencia de carácter colectivo y público.

Por si fuera poco, los enormes recursos utilizados para la materialización y uso de cualquiera de sus obras, muchísimo más importantes que los necesarios para cualquier otro tipo de obra de arte, distancian todavía más si cabe a la arquitectura de otras actividades artísticas ya que imponen un imperativo ético que la obligan moralmente a varias condiciones de tipo económico que afectan a su misma esencia.

La primera es que la materialización del edificio ha de ser lo más eficiente posible, es decir, conseguir el máximo provecho de los re-

cursos utilizados. Desde este punto de vista, el construir arquitectónico es igual a la mayoría de las actividades productivas humanas: la economía de producción le es tan consustancial que normalmente queda implícita, hecho que provoca que muchas veces se ignore.

Ahora bien, el carácter limitado de esos recursos, detectado en realidad hace pocos años, además de obligar a la economía de los medios energéticos que comporta el uso, introduce un novísimo criterio ecológico en la valoración de los procesos de materialización, que no sólo han de ser eficientes en sí mismos, sino compatibles con un desarrollo que no malbarate el patrimonio medioambiental.

La tercera condición económica, a cumplir a largo plazo, es que el edificio ha de ser resistente al paso del tiempo. No podemos reconstruir cada uno o dos años nuestros edificios o alguna de sus partes. Los edificios se han de construir y usar (y reparar si es el caso), para que permanezcan íntegros en su totalidad un período de tiempo dilatado, asegurando además la integridad de sus usuarios frente a eventos catastróficos para todos como incendios o terremotos.

Pero además, la integridad a largo plazo puede ser algo más que una condición económica y de seguridad para sus usuarios directos. Algunos edificios o algunas de sus agregaciones, barrios o ciudades, constituyen parte importante de la memoria de los pueblos y, en consecuencia, signos de su identidad. La perpetuación de un pueblo requiere la perpetuación de su patrimonio cultural y, especialmente, el arquitectónico, por ese carácter envolvente y público.

Podemos reordenar todo lo dicho y concluir que la arquitectura sólo se justifica si facilita y potencia el uso y disfrute de sus artefactos gracias a:

- la adecuación de sus espacios,
- la adecuación del ambiente de esos espacios,
- la conveniencia pública y privada de sus cualidades estéticas y comunicativas,
- la integridad a largo plazo de sí mismos y de sus ocupantes,
- la eficiencia directa y medioambiental de sus procesos de materialización.

Es razonable afirmar que son cinco objetivos imprescindibles para quien quiera construir bien, y los fundamentos axiológicos sobre los que se han de asentar sus criterios de valor. Lo cual permite poder considerarlos, en definitiva, como los cinco principios del construir arquitectónico, tal como se hace en este texto.

Las dos fases del construir arquitectónico

El proceso global de construir una obra de arquitectura pasa, necesariamente, por una fase previa en la que alguien, el arquitecto o profesional equivalente (individual o colectivo), la debe imaginar y plasmar lo imaginado en documentos gráficos y escritos (el proyecto) para que después pueda ser materializada por un colectivo mucho más numeroso. Habitualmente esta fase también se denomina proceso de diseño.

El éxito final del edificio, es decir, el cumplimiento de los cinco objetivos, requiere que ya en este nivel imaginario sea potencialmente adecuado, útil, resistente, etc., ya que los procesos de producción posteriores que lo hacen realidad sólo materializan la idea, y si ésta no es correcta, su realización difícilmente la mejora. Lo cual no impide que la idea pueda mejorarse durante la ejecución de los trabajos.

Para materializar definitivamente la idea es preciso disponer de materiales, herramientas y una legión de operarios hábiles en su manejo y montaje que hagan realidad lo imaginado previamente. El éxito final también dependerá de la adecuación de los materiales finales y de la exactitud de las formas elaboradas por los operarios. Si los materiales no han alcanzado las propiedades requeridas y las formas son diferentes a las imaginadas, difícilmente se cumplirán todos los objetivos propuestos.

Los diferentes conjuntos de manipulaciones, transformaciones, agregaciones, etc., de los materiales que encontramos en la naturaleza, que permiten el paso de lo imaginado a lo real, se denominan aquí procesos de producción, y a los procedimientos concretos para llevarlos a cabo, técnicas de producción.

En resumen, el éxito del construir arquitectónico depende del desarrollo correcto de dos fases, la imaginativa y la productiva, es decir:

- que lo imaginado sea potencialmente útil gracias a su espacio y previsible ambiente, que potencialmente asegure la integridad del edificio y sus ocupantes, que sea estéticamente conveniente, además de susceptible de ser materializado económicamente con los procesos de producción al alcance y,

- que el proceso de producción que hace real lo imaginado consiga las propiedades especificadas para los materiales y configure las formas dibujadas para los elementos y el conjunto del edificio, de manera que aquellas potencialidades se materialicen definitivamente.

Los elementos del construir arquitectónico

El análisis de cómo se consigue que un artefacto arquitectónico cumpla los cinco objetivos requiere destacar su carácter dual, espacio-materia. El edificio es un objeto formado por un espacio cuyos límites están definidos por la materia. Ésta no tiene sentido sin el espacio, y éste no puede existir sin aquélla.

En realidad, cuando construimos organizamos la materia alrededor del espacio. También podemos decir que construir es configurar espacios arquitectónicos, bien diferentes a los espacios naturales, mediante la organización inteligente de la materia a su alrededor.

La materia de un edificio se compone de partes y éstas de elementos. Según la relación que tengan con el espacio del edificio podemos definir tres partes básicas:

- la situada en el espacio exterior del edificio,
- la situada en el espacio interior creado por el edificio,
- la que tiene el papel de frontera entre ambos espacios, que denominaremos envolvente.

La envolvente se compone de elementos tales como cubiertas fachadas, etc., y la del interior de divisiones verticales (tabiques, paredes, etc.) y horizontales (forjados, entrepisos, etc.) todos ellos con unas determinadas formas y realizados con unos materiales concretos.

El espacio se configura mediante estos elementos y, al mismo tiempo, éstos, conjuntamente con las instalaciones (de calefacción, de iluminación, etc.), definen el ambiente de ese espacio. Las fachadas, las cubiertas, las divisiones interiores, etc., tienen, pues, una doble

misión esencial, configurar el espacio y su ambiente.

La integridad a lo largo de los años de todo lo que se ha construido (cerramientos, instalaciones y sus soportes), dependerá, obviamente de la propia materia. El espacio no interviene. La resistencia al paso del tiempo dependerá de la adecuación de los materiales utilizados y, especialmente, de las formas de los elementos y del propio edificio.

El coste de producción global depende del coste de los materiales y sus manipulaciones y, aunque en sí mismo el espacio no tiene coste alguno, sí lo tiene el terreno que ocupamos en planta.

Y si bien la percepción estética siempre ha de considerar el conjunto espacio-materia, es posible analizar la contribución de ésta por sí misma.

Pues bien, este libro se centra en el estudio de la materia y sus elementos, las fachadas, las cubiertas, las instalaciones, etc., pero sin dejar de prestar atención cuando sea necesario al espacio que todos ellos configuran con el fin de poner de manifiesto su indisoluble relación. Es un estudio sobre cómo la parte material de los edificios contribuye al cumplimiento de los objetivos de la arquitectura, que se ha de completar por el lector con el de la contribución del espacio y con valoraciones conjuntas de ambas partes que, sólo cuando se suman, forman la obra arquitectónica.

Al conjunto de conocimientos sobre esos elementos materiales, sus soluciones constructivas y las reglas que rigen su utilización y combinación con el fin de alcanzar los cinco objetivos se denomina aquí saber constructivo.

Las dos partes de este texto

El método más eficaz para la exposición de este saber constructivo requiere distinguir entre Elementos y Principios, destacando, además, las relaciones por las que unos y otros se potencian y condicionan. En el primer tomo de este texto se exponen los Principios y en el segundo y el tercero los Elementos. En el tomo I, de carácter conceptual y propedéutico, se estudian las leyes que regulan las conexiones exis-

tentes entre los cinco objetivos o principios, y sus consecuencias concretas, requisitos y exigencias, con tal de poder medir las prestaciones de las soluciones constructivas posibles. Se incluyen los aspectos más generales del CTE.

Son principios y leyes, cuyos aspectos generales conservan su validez por encima de variaciones temporales y geográficas de los factores culturales y productivos y, en consecuencia, también básicos para un profesional de la “arquitectura sin fronteras”.

Los tomos II y III, descriptivos y taxonómicos, se orientan a la aplicación de los principios a nuestro entorno más cercano y a comprobar cómo nuestra manera de construir cumple o no esos principios. De la relativa universalidad de la primera parte se pasa a un cierto localismo de la segunda, como ejemplo de aplicación y análisis de nuestra propia realidad. También se incluyen los aspectos generales del CTE acerca del modo como los elementos pueden aportar las prestaciones que aseguran el cumplimiento de las exigencias derivadas de los principios.

El ámbito de estudio de ambas partes se centra en edificios corrientes dedicados a vivienda o usos colectivos tales como escuelas, residencias, etc.

El primer tomo puede considerarse como de planteamiento de los problemas y el segundo y el tercero como un repertorio crítico de soluciones habituales que los resuelven.

En general, cualquier estudio sobre problemas y soluciones constructivas requiere dos fases bien diferenciadas:

- en primer lugar, la comprensión de las relaciones que existen entre los problemas, sus soluciones y los diferentes fenómenos físicos cuantificables,
- y en segundo, el uso de métodos de cálculo que, mediante la modelización matemática de esos fenómenos, permiten cuantificar tanto los problemas como las soluciones y, en parte, aumentar su comprensión.

Sin necesidad de acudir al cálculo, este libro aporta la comprensión de la mayoría de las relaciones con los problemas físicos a partir de la experiencia cotidiana del lector novel que se considera aquí como una fuente inagotable

de conocimiento. Si se desea profundizar en los procedimientos de cuantificación se debe acudir a obras de especialidad, aunque se recomienda no hacerlo sin antes haber comprendido a fondo todo lo que se expone en estas páginas.

La organización de tomos, capítulos, temas y apartados tiene como objetivo hacer fácilmente aprehensible el *mare magnum* de nuevos conceptos (requisitos, exigencias, prestaciones y propiedades de subsistemas, elementos, formas y materiales) en el que es preciso desglosar los problemas y sus soluciones.

El primer tomo se organiza según los cinco principios indicados. El segundo y el tercero según la descomposición del edificio en sus cinco partes más significativas, teniendo en cuenta los espacios que configuran, el exterior, el interior, la frontera entre ambos, las instalaciones y los elementos que aseguran la estabilidad de todo el conjunto.

Es un esquema fácilmente memorizable, pero que abarca todos los factores en juego (y no sólo los más atractivos), que es coherente con la mentalidad de los que se dedican a la arquitectura y a la vez con su propia experiencia personal como usuarios de ella. No debe olvidarse esa experiencia de usuario como una imprescindible y fecunda fuente de conocimiento.

En definitiva, el lector, una vez asimilados los contenidos del libro, dispondrá de un saber constructivo básico compuesto de:

- una herramienta de análisis que le permitirá comprender y valorar, en una primera aproximación suficiente en muchos casos, el qué, el cómo y el porqué de las formas y los materiales de los edificios habituales de nuestro país,
- un repertorio de elementos constructivos y de criterios sobre su utilización que le permitirán iniciar los ejercicios de imaginar edificios con suficiente garantía de su potencial adecuación en todo lo que depende de la materia,
- una estructura conceptual básica que le permitirá ordenar sistemáticamente los nuevos conocimientos que, si desea progresar en este campo, deberá buscar en otras obras más especializadas.

Si es así, se habrán cumplido los objetivos fundamentales de este texto.

TOMO I. **Principios**

Introducción

En este **Tomo I** se exponen las leyes que regulan los nexos existentes entre los grandes objetivos o principios generales y los aspectos más detallados de los elementos constructivos según los sucesivos niveles de concreción siguientes:

1) Los Principios se traducen en numerosas y diversas condiciones, que denominaremos **requisitos** y que, según sea su naturaleza, dependen de una o más **variables**.

2) La satisfacción de los requisitos, medidos según sus variables, exige de los edificios, sus partes (que también denominaremos subsistemas constructivos) y sus elementos, unos modos de comportamiento genéricos, que denominaremos **exigencias**.

3) Para saber si una solución constructiva, es decir, una manera determinada de construir un elemento, un subsistema o un edificio es la adecuada para esas exigencias, debemos conocer las **prestaciones** que es capaz de aportar (el elemento, el subsistema o el edificio) frente a cada exigencia en concreto; la prestación habrá de ser igual o superior a la exigencia.

4) Las prestaciones son consecuencia de las **características** de las **formas** y los **materiales** que constituyen los elementos constructivos.

5) Las características de las formas y los materiales dependen de los **procesos de producción** que hacen posibles esas formas y esos materiales.

Por ejemplo, el objetivo general de la adecuación del ambiente se concreta en cinco requisitos, protección del agua, comodidad térmica, control de iluminación, y protección contra la contaminación y el ruido. Sigamos en este último (I-7). Cumplir el requisito de la como-

didad acústica en el interior de un edificio depende, entre otras cosas, de la variable “intensidad del nivel sonoro” que de día no debe superar los 40 dBA. Para que esto ocurra, entre otras muchas más cosas, se debe exigir a las paredes que nos separan de los vecinos que den un aislamiento de 50 dBA (ésta es la exigencia que afecta al elemento constructivo), lo cual se consigue con seguridad mediante una pared de hormigón que aisle unos 54 dBA (ésta es la prestación de esta solución concreta, algo superior a la exigencia como método para ir sobre seguro) debido a que tiene un espesor de 16 cm (la forma) y está realizada con hormigón armado con una densidad de 2.500 kg/m³ (el material), siendo estas dos características consecuencia de los procesos de producción de los materiales y de su puesta en obra.

En el ejemplo anterior, la exigencia se concreta en variables fácilmente cuantificables, pero en otros muchos casos el cumplimiento de las exigencias pasa por cuestiones difícilmente convertibles en un solo número o puramente cualitativas como, por ejemplo, una apariencia concreta.

Las exigencias cuantificables que se derivan de requisitos que se relacionan con la seguridad y bienestar de los usuarios de los edificios, generalmente queda fijadas por normativas de obligado cumplimiento emitidas por las diferentes administraciones públicas. Por encima de su carácter coercitivo, hay que considerar a las normativas obligatorias como el resultado de un acuerdo entre expertos en los temas respectivos, y como guías útiles de los niveles mínimos a cumplir, pero que, obviamente, también pueden superarse si se considera oportuno.

Tal como ya se ha indicado en la Presentación, la ley que regula todo el proceso de edificación en nuestro país es la LOE, que establece los requisitos básicos de la edificación agrupados en tres categorías, funcionalidad, seguridad y habitabilidad. Veamos cada una de ellas y la parte del presente tomo I en que se desarrollan.

Los englobados en la categoría de funcionalidad son utilización y accesibilidad a los edificios (los dos de desarrollan en el tema 1). Las normativas que los regulan normalmente dependen de administraciones autonómicas o locales.

Los de seguridad y de habitabilidad quedan regulados por el CTE. La seguridad según tres aspectos: estructural (se estudia aquí en los temas 1, 2 y 10 del tomo I), en caso de incendio (I-9) y de utilización (I-8). La habitabilidad, según: higiene, salud y medio ambiente (aquí en I-3 y I-6), protección del ruido (I-7) y ahorro de energía y aislamiento térmico (I-4 y I-5). En los tomos II y III se amplía su estudio.

Puede comprobarse que el conjunto de los tres tomos incluye todos los aspectos básicos exigidos por la LOE y el CTE, y que va más allá pues aborda temas que quizá también debería haber tratado el CTE, por ejemplo, la resistencia al paso del tiempo, u otros que quedaban fuera de su ámbito, como lo relacionado con la producción y, obviamente, la estética. Por otro lado, la estructura de este primer tomo también es diferente, por una razón obvia: una cosa es un código de obligado cumplimiento y otra un libro cuyo objetivo es la formación de futuros profesionales de la edificación.

Es importante destacar que la gran dificultad de construir bien es que no existe una respuesta única a cada exigencia, sino múltiples posibilidades, y que, además, cada elemento constructivo tiene que dar respuesta simultánea a varias de ellas, muchas veces contradictorias entre sí. Las soluciones concretas normalmente cumplen bien unas exigencias y otras no tanto. La exigencia del ejemplo anterior también se puede satisfacer ampliamente mediante paredes de ladrillo o con dobles tabiques de yeso laminado, pero mientras que las de hormigón o ladrillo pueden ser portantes, no ocurre lo mismo en el caso de la tercera, aunque aquéllas sean mucho más pesadas e inamovibles.

Construir bien es encontrar la solución óptima. Y la solución constructiva óptima es la que consigue un buen cumplimiento de todas las exigencias, aunque no el mejor en cada una de ellas por separado. En los tomos II y III se estudian las soluciones constructivas más habituales que satisfacen de un modo más o menos equilibrado cada una de las exigencias.

Los tres primeros capítulos de este tomo I se dedican a los principios de adecuación del espacio, del ambiente y de la integridad global, que también denominamos razones prácticas. El cuarto capítulo relaciona eficiencia con procesos de producción.

Tanto las variables geométricas de materia y espacio y las del ambiente como las que condicionan la eficiencia de producción y la integridad, son cuantificables, es decir, adecuadas para ser medidas numéricamente, y se pueden establecer sobre ellas unos criterios de valor estrictamente objetivos y susceptibles de conocimiento científico.

Que el conjunto construido alcance el calificativo de obra de arquitectura, es decir, que además se alcance la conveniencia estética, es, sin duda, el aspecto más complejo de todos. Intervienen en él, además de todos los anteriores, los factores de la percepción psicológica y artística que, a su vez, inciden, generalmente, sobre el conjunto espacio-materia, es decir, la obra arquitectónica completa, sin las fragmentaciones practicadas para analizar los aspectos cuantificables. Los criterios de valoración no pueden ser del mismo tipo que los anteriores, pero no quedan tratados aquí.

Así, el objeto del capítulo V sólo es dejar constancia de las relaciones dialécticas que se establecen entre los objetivos cuantificables y todo lo que hace de la arquitectura un arte, es decir, que los edificios sean capaces de producir efectos plásticos, expresivos o emotivos. Dicho de otra manera, trata de demostrar que la consecución de la conveniencia estética está, ineludiblemente, en relación de diálogo más o menos conflictivo con el cumplimiento de las razones prácticas y los procesos de producción.

Sólo con la comprensión del carácter de esas relaciones se consigue acceder a todas las claves del construir arquitectónico.

CAPÍTULO I. Adecuación del espacio

El principio de adecuación del espacio

Un edificio responde a las necesidades prácticas para las que ha sido concebido cuando su uso permite que se realicen en su interior, de la mejor manera posible, las actividades para las que ha sido pensado, amar, dormir, enseñar, parlamentar, orar... Si es así, se suele decir que es útil o también funcional.

Antes de seguir es conveniente una precisión terminológica. Es habitual utilizar la palabra funcional de manera equivalente a la que se ha dado aquí a útil. Pero el concepto de función de un edificio en realidad no se agota en su utilidad estricta, sino que puede y debe abarcar otros valores, como los simbólicos o estéticos. Dado que tiene tan diferentes significados, se ha preferido utilizar el vocablo “función” el mínimo número de veces. En el caso de ser conveniente su uso se hace precisando su significado añadiendo un calificativo como, por ejemplo, “función utilitaria”. Al final de I-1 se precisan las diferencias entre uso y función.

Volviendo al tema, que un edificio sea útil depende de la adecuación a las actividades que se han de desarrollar en su interior depende de tres factores fundamentales:

- la organización espacial del edificio,
- el ambiente exterior inmediato y el ambiente interior producido por el propio edificio,
- el equipo.

Por organización espacial (o también distribución) entendemos el conjunto formado por los diferentes espacios que componen el edificio, definidos por sus características geométricas (dimensiones, proporciones, etc.) y la interrelación que tienen mediante otros espacios de conexión o de recorrido entre ellos.

El ambiente es el conjunto de variables físicas, químicas y biológicas del aire de ese espacio en el que se desarrollan las actividades de las personas y que condicionan sus sensaciones fisiológicas y psicológicas.

El equipo es el conjunto de enseres, herramientas, muebles, aparatos, etc., que permiten y facilitan el desarrollo de estas actividades. Habitualmente lo suministra el propietario o el usuario de la obra. No obstante, diversos elementos del equipo, tales como el mobiliario de cocina y algunos tipos de instalaciones de comunicación como el teléfono, etc., también pueden ser suministrados por el constructor.

No se desarrolla en este texto ningún estudio sobre el equipo, aunque se hacen menciones constantes a él como condicionante, en ocasiones decisivo, de los elementos que configuran los paramentos de los espacios interiores. Es preciso que el que imagina el edificio no olvide estos condicionantes y, en cualquier caso, la influencia de los diferentes elementos del equipo en las dimensiones del espacio, además de prever que el ambiente puede quedar modificado por ellos.

El análisis que se desarrolla en este capítulo se centra en las implicaciones de la adecuación de organización espacial en los elementos constructivos que la conforman. El segundo capítulo lo hace sobre las implicaciones de la adecuación del ambiente.

El estudio de la adecuación de la organización espacial de un edificio requiere distinguir dos tipos de espacio y dos tipos de elementos materiales que los definen:

- el espacio que rodea el edificio o espacio exterior,
- el espacio interior de este edificio,

- el elemento material delimitador que separa el interior del exterior, que denominaremos envolvente, y,
- los elementos materiales, que a su vez subdividen el espacio interior en espacios de menor tamaño que denominaremos compartimentación.

Los dos temas que siguen analizan las consecuencias que tiene la adecuación del espacio en la configuración constructiva de la parte material del edificio. Pero también la relación inversa, es decir, la influencia que tienen en el propio espacio las posibilidades constructivas de esa parte material que actúa como delimitador. En definitiva, la relación dialéctica básica que existe entre espacio y materia.

El análisis no se hace partiendo de los espacios en sí mismos, sino sobre las consecuencias del uso de ese espacio. No se trata de relaciones abstractas, independientes de posibles acciones de los usuarios, sino de cómo influyen las necesidades de éstos.

Con el fin de no perder de vista la complejidad de la interrelación entre todas las variables, también abarca, en una primera aproximación, la manera como los delimitadores del espacio tienen además el encargo de crear un ambiente interior mejor que el ambiente natural que envuelve el edificio.

TEMA 1. Uso, delimitadores y estructura

UTILIDAD DE LOS DELIMITADORES ESPACIALES

- La envolvente del espacio interior
- Relaciones de uso entre espacio interior y exterior
 - Vistas o visuales*
 - Desplazamientos*

- La compartimentación del espacio interior
 - Relaciones de uso entre espacios interiores*
 - El uso como factor determinante*

ESTABILIDAD DE LOS DELIMITADORES ESPACIALES

- Delimitadores horizontales
- Delimitadores verticales
- La estructura portante

ESTRUCTURA Y VARIABILIDAD DE LOS USOS

CLASIFICACIÓN BÁSICA SEGÚN USOS Y ESTRUCTURAS

UTILIDAD DE LOS DELIMITADORES ESPACIALES

La envolvente del espacio interior

La envolvente está formada por la cubierta, la fachada y los cerramientos en contacto con el propio terreno. El tratamiento de estos últimos, al no separar espacios, se pospone a los apartados propios del ambiente sobre el cual sí que tienen influencia. Aquí nos fijaremos especialmente en las fachadas y en las cubiertas, ya que son los elementos que delimitan los espacios.

Consideradas como delimitadores espaciales, en las fachadas es preciso diferenciar las partes ciegas de las aberturas. Las primeras son intraspasables y no transparentes, mientras que las puertas o ventanas tienen la facultad de ser todo lo contrario y, además, con estas características susceptibles de ser modificadas a voluntad del usuario. Las fachadas siempre se han de considerar como una suma compleja de estos dos tipos antinómicos de elementos.

Ahora bien, en las fachadas pueden encontrarse unos elementos intermedios que bien pueden denominarse espacios semiexteriores o semiinteriores, ya que participan a medias de las características de los dos espacios fundamentales. Cabe considerar entre ellos los por-



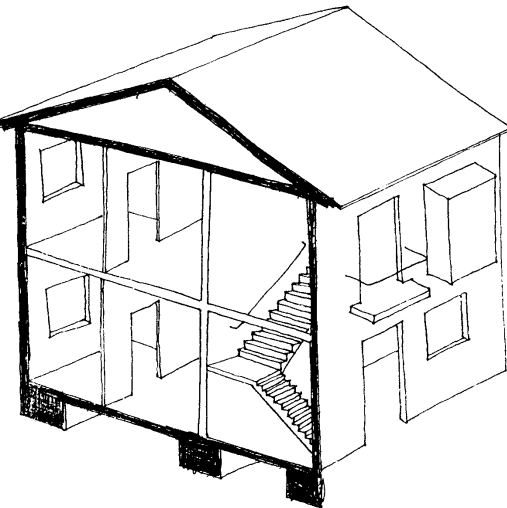
Las fachadas de los edificios de vivienda generalmente disponen de varios tipos de conexiones entre los espacios interiores y exteriores.

ches, las tribunas, las galerías, las terrazas semiabiertas, las terrazas abiertas e inclusive los balcones.

Todos ellos tienen como característica común el pertenecer al mismo tiempo al interior y al exterior del edificio, y precisamente ésta es su principal virtud, la ambigüedad de su propio carácter espacial, que les confiere unas interesantes potencialidades como intermedios entre el ambiente exterior e interior, especialmente para el uso de vivienda.

La cubierta, si bien también puede disponer de partes traspasables y transparentes, la mayoría de las veces está constituida por partes macizas. No hay que olvidar su posible carácter de espacio semiexterior, o exterior totalmente, cuando es transitable.

Los elementos de la envolvente, por el hecho de tener la misión de evitar, incentivar, o ambas cosas a la vez, las múltiples relaciones entre el interior y el exterior, están sometidos a tres requisitos fundamentales:



- han de ser estables,
- han de generar un ambiente interior, diferente del natural o artificial exterior, adecuado a las actividades internas y,
- han de organizar las relaciones, que denominaremos de uso entre los espacios exteriores e interiores.

Veamos cada requisito por separado.

Los elementos de la envolvente han de ser estables desde el primer momento frente a las acciones gravitatorias y durante el periodo de vida previsto para el edificio. Todo ello se estudia con más detalle en I-2 y I-10, pero aquí es preciso iniciar su análisis dada su trascendencia en la configuración constructiva de los elementos que condicionan el propio carácter formal del espacio. Lo veremos después conjuntamente con la estabilidad de la compartimentación interior.

Sobre las relaciones entre ambientes sólo es preciso decir ahora que las variables ambientales naturales que dependen del clima, es decir, la lluvia, el calor, el frío y la luz natural, serán aquellas que más incidan en la configuración de la envolvente. En los casos de concentración humana, como en las ciudades, las variables artificiales, tales como el ruido, pueden alcanzar mayor importancia.

Veamos ahora las que hemos denominado relaciones de uso.

Relaciones de uso entre espacio interior y exterior

En general, la percepción por parte de las personas del espacio que las rodea requiere su visión en movimiento, y aunque las percepciones táctil y sonora enriquecen esa percepción, son las imágenes que se acumulan mediante un recorrido por él lo que nos permite la aprehensión del espacio que nos rodea.

También, desde el punto de vista de la actividad del usuario, es decir, el uso que hace del espacio, la vista y el movimiento son los dos factores básicos que condicionan la configuración constructiva de los elementos de la envolvente. Cualquier actividad que se desarrolle en un edificio exige el desplazamiento hacia él desde el exterior y después por su interior. Al mismo tiempo, es imprescindible mantener el contacto visual entre el espacio interior y el exterior. Estos dos tipos de relaciones consustanciales al uso son los que obligan a resolver de una manera muy determinada los delimitadores del espacio.

Dicho de otra manera, en la misma esencia de la arquitectura está que los espacios que crea estén intercomunicados entre sí física y

visualmente, lo cual condiciona totalmente la configuración básica de los elementos que los delimitan. Veamos por separado cómo influyen cada uno de los dos tipos.

Vistas o visuales

Son posibles en los dos sentidos: de fuera hacia dentro y de dentro hacia fuera. En general, las que son imprescindibles en la totalidad de los casos son estas últimas y sólo en pocos casos se requiere la visión del interior desde el exterior. Es más, en la mayoría de los casos la privacidad requiere no ser vistos desde el exterior.

La importancia de las vistas exteriores al edificio es fácil de entender y no hace falta dar muchas explicaciones para apreciar la diferencia que existe entre estar frente al mar, frente a un paisaje rural apacible, o frente a una industria siderúrgica.

Cuando se puede influir en la elección del terreno, un factor importante para decidir será sin duda el de las visuales que se ofrecen desde el lugar a elegir.

En cualquier caso, la visión del exterior es imprescindible para mantener nuestro contacto con las variaciones meteorológicas o simplemente el paso del tiempo según la situación del sol. Son precisamente las aberturas, por el hecho de ser transparentes, las que nos permiten ese contacto interior-exterior y sólo por esta razón ya estaría suficientemente justificada su necesidad, que viene reforzada por ser parte importante de los procedimientos de modificación a voluntad del ambiente. Pero como se demuestra en los edificios en los que no existen aberturas por tener un ambiente totalmente controlado desde el interior, la visión del exterior sigue siendo una exigencia irrenunciable, y en los casos en la que viene dificultada puede ser motivo de rechazo decidido por parte de los usuarios. Como excepción cabe considerar el caso de los grandes almacenes comerciales en los que la necesidad de captar la atención del posible comprador hacia la mercancía expuesta aconseja evitar la visión del exterior, desapareciendo por completo las ventanas.

La incidencia de las vistas exteriores en la situación y configuración de las aberturas y sus

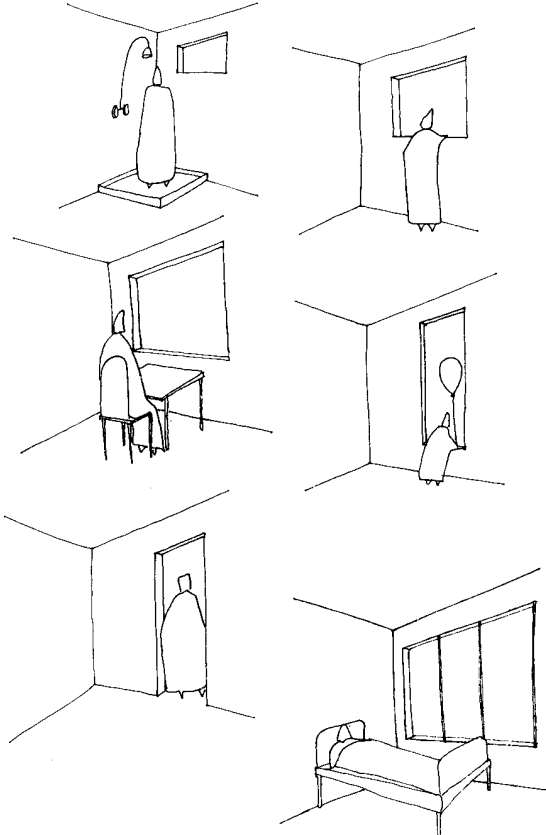
carpinterías depende lógicamente del lugar donde está situado el edificio. Si se nos ofrece un paisaje de singular interés, su visión puede llegar a condicionar en gran medida la distribución espacial interior y con mayor razón la propia estructura del cerramiento que nos va a permitir la visual, sea una ventana o cualquier otro procedimiento.



La carpintería de los huecos ha de favorecer la conexión visual con el espacio exterior.

La forma de la abertura también deberá tener en cuenta la altura de los ojos del posible observador. No es lo mismo una abertura sobre un lugar de paso en el que los observadores

potenciales siempre están de pie, que la ventana de un hospital en el que domina el observador acostado, o las de una escuela maternal con observadores bien menudos.



En todos los casos, el vidrio es el que resuelve la contradicción entre vistas y cerramiento, pero siempre que sea realmente transparente, lo cual entra en conflicto con el inevitable ensuciamiento. Así, tan importantes son todos los factores anteriores como que el vidrio se pueda limpiar fácilmente y con toda seguridad, como obliga el CTE-SU-1. En los últimos años se han desarrollado muchos procedimientos para ello, que pueden llegar incluso a configurar la forma de las fachadas (I-16).

En definitiva, todos los factores que inciden en la conexión visual entre espacio interior y exterior, incluida la limpieza del vidrio, pasan



Si la ventana no es practicable pero está a poca altura, la solución es fácil.

a ser fundamentales en la configuración de la envolvente y en especial en el diseño de las aberturas, tal como se expone detalladamente en III-7.1 y III-8.

Desplazamientos

Los desplazamientos entre espacio interior y exterior, lógicamente, también tienen consecuencias determinantes en la configuración de las aberturas de la envolvente y en la de los pavimentos de los dos espacios.

Se ha de distinguir, desde el punto de vista de su frecuencia, entre los normales, los de emergencia y los no deseados. Entre los primeros también pueden distinguirse los usuales, que son los que se realizan habitualmente cada día formando parte del desarrollo normal de la

actividad, y los no usuales, aquellos que, si bien son normales, se dan de vez en cuando, como puede ser la entrada de equipo, como muebles, o la salida de un ataúd.

Los de emergencia se limitan habitualmente a la huida apresurada en el caso de un incendio (I-9).

Entre los no deseados caben aquellos que desde el exterior llevan al interior a individuos amigos de la propiedad ajena, y los de sentido inverso a través de una abertura, no considerada de paso pero poco segura, como la caída desde una ventana (I-8).

Las aberturas han de estar resueltas de manera que eviten totalmente los desplazamientos no deseados (CTE-SU-1), faciliten los de emergencia y permitan sin ningún impedimento los normales, sean usuales o poco frecuentes (III-7.1 y, especialmente, III-7.1.4).

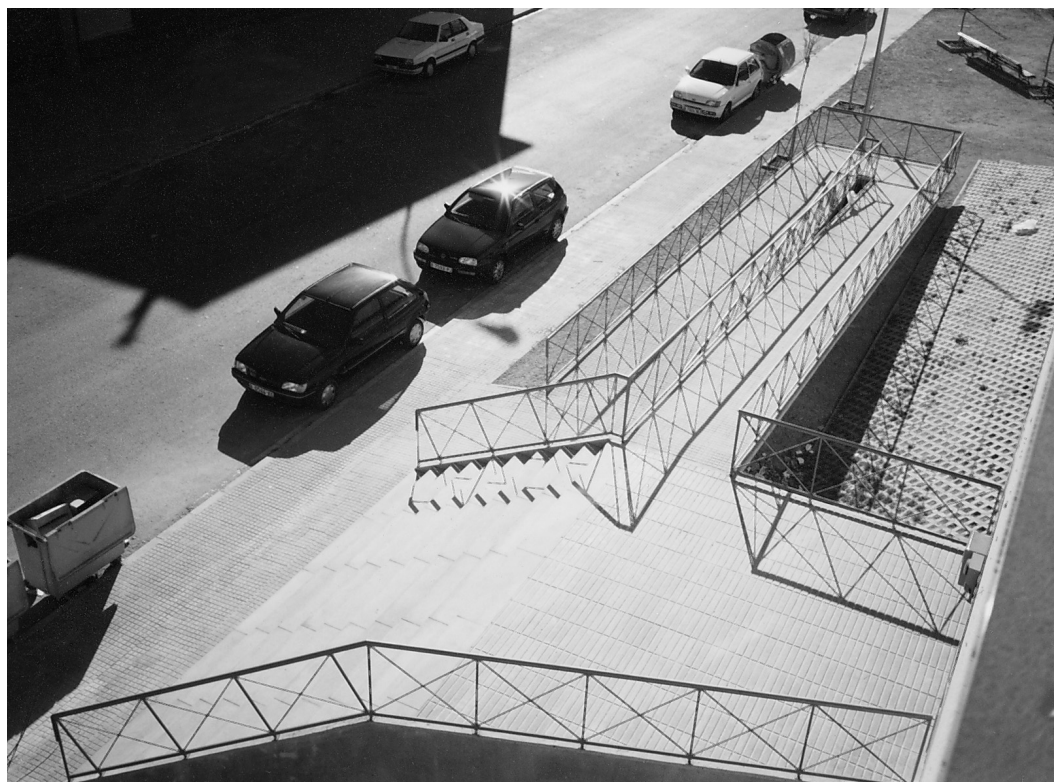
La configuración de los pavimentos está condicionada por el tipo de usuario, que desde este punto de vista se puede clasificar en nor-

mal y con dificultades. Desde hace pocos años, por medio de las leyes de supresión de barreras arquitectónicas, se ha impuesto en nuestro país la lógica de otorgar al usuario con dificultades de desplazamiento el protagonismo en el diseño de los accesos y circulaciones de los edificios (II-1.2 y II-9.2).

El escaso tiempo transcurrido desde la puesta en vigor de esos reglamentos explica que todavía no sea una cuestión asumida totalmente por los que deciden la configuración de los edificios. Sin duda, la arquitectura comprometida con el progreso la ha de incorporar creativamente en sus modos de hacer.

La compartimentación del espacio interior

Una vez se ha conseguido crear un espacio interior diferente al natural, en la gran mayoría de los casos es preciso subdividir en espacios

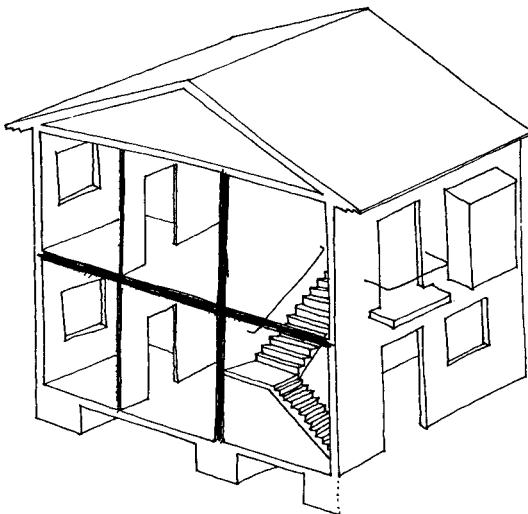


La reducida pendiente obliga a largos desarrollos de las rampas.

de tamaño adecuado a las actividades a desarrollar que, además, consiguen, si están superpuestos, hacer más económica la ocupación del terreno. Podemos considerar dos casos extremos y todos los intermedios: edificios con un espacio interior principal que ocupa su totalidad y edificios con espacio interior fuertemente compartimentado en espacios más pequeños. En el primer extremo se ubican los edificios dedicados a actividades que comportan una ocupación pública, tales como iglesias, locales de espectáculos, etc. En el otro extremo se sitúan los edificios de vivienda en los que el espacio se subdivide hasta llegar a los espacios domésticos más pequeños, sin que ninguno de ellos sea mucho mayor que el resto.

Los delimitadores interiores básicamente pueden ser de dos tipos:

- las divisiones verticales que separan espacios en el mismo nivel, como muros, paredes, tabiques o mamparas, y
- los elementos horizontales, también denominados en este libro entrepisos, que separan los espacios superpuestos y, generalmente, están formados por un forjado, un techo y un pavimento.



El conjunto de estas separaciones, verticales u horizontales, que denominamos compartimentación, está sometido a cinco requisitos fundamentales, los tres de la envolvente, más dos propios, es decir:

- ser estable,
 - controlar las relaciones entre los ambientes de los diferentes espacios interiores,
 - organizar las relaciones de uso entre esos espacios,
- y los dos requisitos propios,
- facilitar la actividad del usuario,
 - disponer de cierta movilidad propia, especialmente las divisiones verticales, con el fin de aportar flexibilidad a los cambios de uso.

Tal como se ha dicho anteriormente, las condiciones de estabilidad pasan a estudiarse en el apartado siguiente conjuntamente con las de la envolvente, que en el caso de las divisiones verticales se ha de considerar al mismo tiempo que su movilidad, tal como se explica líneas adelante.

Con relación a los ambientes interiores, y adelantando ideas del segundo capítulo, se ha de decir que controlado el clima por la envolvente exterior y las instalaciones, existen pocas variaciones climáticas entre los diferentes ambientes de espacios contiguos. Ni la lluvia, ni el calor, ni el frío, ni la luz natural condicionan apenas la compartimentación, aunque, la necesidad del acceso de la luz natural al interior del edificio puede tener bastante influencia en algunos casos. Son las variables artificiales, las debidas a nuestras costumbres sociales, las que llegan a influir mucho más en los cerramientos interiores, ya que son elementos que separan locales en los que el ambiente se deriva de nuestra propia actividad. El aislamiento del ruido, por ejemplo, puede llegar a tener una incidencia altísima (1-7).

Veamos la influencia directa del uso.

Relaciones de uso entre espacios interiores

Lo ya explicado sobre las relaciones visuales en el apartado anterior siguen siendo válido. Las vistas a través de los cerramientos interiores se resuelven también con aberturas transparentes o bien con paredes ellas mismas transparentes. Son casos poco usuales, aunque no hay que olvidarlos.

Con relación a los desplazamientos, es necesario añadir a la clasificación anterior, según la frecuencia, otra topológica: los despla-

mientos pueden ser verticales y horizontales. En el primer caso se resuelven mediante las escaleras (II-10) o ascensores (III-1.1), y en el segundo con los espacios especialmente habilitados para ello, sean pasillos, vestíbulos, etc.

Son especialmente importantes las características de los planos de marcha. En todos los casos han de cumplir las exigencias de seguridad y comodidad. No serán seguros si no evitan el resbalamiento, en especial en las escaleras (CTE-SU-1 y I-8, II-9.1 y II-10).

El uso como factor determinante

A diferencia de la envolvente exterior, la compartimentación ha de cumplir una cuarta condición básica, facilitar la propia actividad a desarrollar en el espacio que encierra, por medio de:

- el control final del ambiente mediante los acabados superficiales,
- la distribución de las instalaciones,
- la incorporación del equipo necesario,
- un contacto físico con el usuario que, además de facilitar la actividad y ser agradable, no ha de presentar ningún riesgo.

Desde el punto de vista de la iluminación ha de reflejar y orientar la luz que entra del exterior; ha de adecuar definitivamente el ambiente térmico por el contacto directo del usuario con los materiales, paramentos y pavimentos, y el acústico por medio de la absorción o bien configurando formas y direcciones, favorables en locales en los que la audición pasa a ser prioritaria.

Además, el control de las variables climáticas del ambiente y las de seguridad e higiene, realizado con la ayuda de las instalaciones, exige a la compartimentación interior la distri-

bución de las diferentes redes de conductos en los diversos espacios, lo cual comporta una serie importante de condiciones añadidas a las ya citadas.

También es necesario constatar la importancia que tiene para la correcta situación y uso del equipo los cerramientos interiores, tanto verticales como horizontales, que le sirven de soporte.

Por último, no hay que olvidar que los acabados interiores de los delimitadores son las únicas partes del edificio con las que se entra en contacto físico directo, los pavimentos de manera constante y las paredes con cierta frecuencia. Ese contacto ha de ser lo más amable y potenciador de la actividad posible y, además del resbalamiento ya citado, no ha de suponer ningún riesgo.

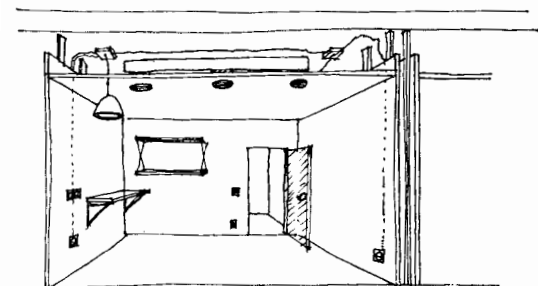
En definitiva, si a todas estas condiciones se añaden las de estabilidad y cierta movilidad, queda claro que los elementos de la compartimentación y sus acabados superficiales son tan complejos, o a veces más, que los de la envolvente, y, a diferencia de éstos, están mucho más condicionados por los diferentes tipos de uso de los edificios (II-9).

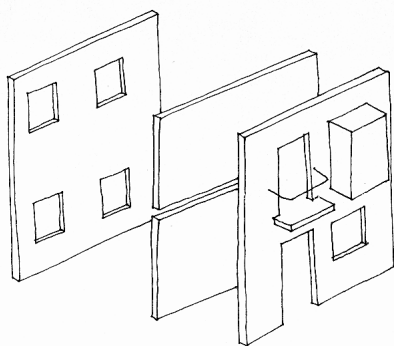
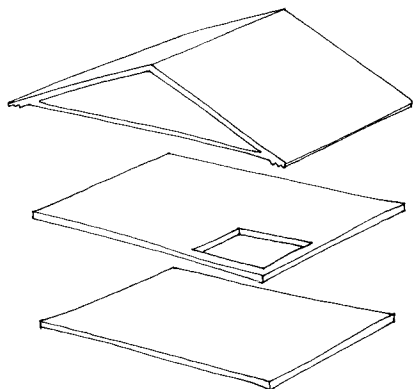
ESTABILIDAD DE LOS DELIMITADORES ESPACIALES

Los elementos delimitadores del espacio, de la envolvente o la compartimentación, han de ser desde el momento de su construcción estables frente a las acciones capaces de “derribarlos” que, con certeza total, actuarán desde el primer momento, como son las acciones gravitatorias. Aunque, como se analiza en I-10, no son las únicas acciones posibles, ya que el viento y los seísmos también pueden comprometer la estabilidad, las acciones debidas a la gravedad terrestre son las que inciden de manera decisiva en la conformación del espacio.

Desde el punto de vista de su estabilidad, los delimitadores espaciales se clasifican en horizontales y verticales, ya que el efecto de la acción de la gravedad sobre ellos es diferente según sea esa posición.

En el primer caso han de ser capaces de resistir las fuerzas transversales a su dimensión mayor como consecuencia de estar apoyados en sus dos extremos, teniendo que soportar un





peso encima de ellos. En el segundo, y si son paredes portantes, los esfuerzos serán consecuencia de transmitir, además de su propio peso, los de los elementos horizontales apoyados en ellos. Si son tabiques han de ser estables a las acciones horizontales ocasionadas por el uso.

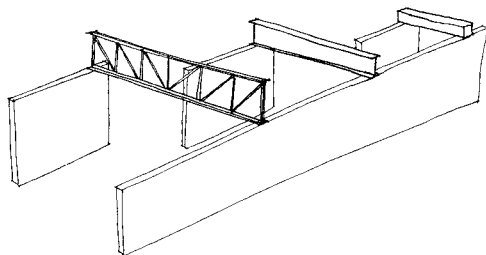
Vistos así, los forjados y las cubiertas forman el conjunto de los delimitadores horizontales, y las fachadas y las divisiones interiores el de los verticales, siendo su situación interior o exterior irrelevante en cuanto a su estabilidad frente a las acciones gravitatorias.

Delimitadores horizontales

La variable que más influye en su configuración constructiva es la luz que salva o distancia entre sus apoyos como consecuencia del espacio

que cubren. En general, si nuestro edificio es de viviendas, las luces serán pequeñas, estarán comprendidas entre cuatro y seis metros. Si el edificio contiene una sala para algún tipo de actividad pública, como una gran aula o una sala de espectáculos, las luces suelen oscilar entre quince y treinta metros, pero pueden llegar a mucho más. Las soluciones son diferentes en cada caso, pero siempre están basadas en alguno de los cuatro métodos básicos siguientes:

1) Viga apoyada en dos puntos: se puede considerar como la más primitiva y la que la propia naturaleza nos ofrece mediante los troncos de los árboles, que puestos en horizontal son dispositivos claramente útiles al respecto. Si la luz aumenta, es necesario que el tronco del árbol sea más grueso o mayor el canto de la viga. Existe una clara relación entre la luz a salvar y el canto de la viga, a mayor luz, mayor exigencia de canto. Si la luz aumenta considerablemente es posible que exija un canto tan grande que el peso propio de la viga sea suficiente para romperla. En este caso deberemos utilizar vigas en celosía con un peso propio reducido, pero que disponen de suficiente canto para no romperse en las luces grandes. Es el segundo procedimiento.



2) Vigas en celosía, con infinidad de formas, pero todas basadas en el hecho de que tres barras unidas en sus extremos forman un polígono indeformable, aunque los nudos permitan que las barras giren antes de formar el triángulo (lo cual no ocurre con el cuadrado, por ejemplo) y que la agrupación de triángulos rígidamente unidos dan una forma más compleja también indeformable.

Es importante destacar que en ambos casos las vigas, si están simplemente apoya-

das, transmiten a los elementos en que se apoyan cargas estrictamente verticales, lo cual no ocurre en los dos sistemas siguientes, en los que además se producen empujes horizontales.

3) Arcos y bóvedas; si se hace un estudio histórico se puede observar la gran difusión a lo largo de siglos de elementos arqueados para resolver el franqueo de los espacios de los edificios. Si bien las bóvedas están presentes en la arquitectura actual, su uso ha quedado restringido a edificios singulares.

4) Cables a tracción; lo mismo podemos decir del cuarto procedimiento, su utilización es aún más inusual en los edificios corrientes.

Las soluciones habituales de la cobertura de los espacios en los edificios actuales siempre son variantes de los dos primeros procedimientos.

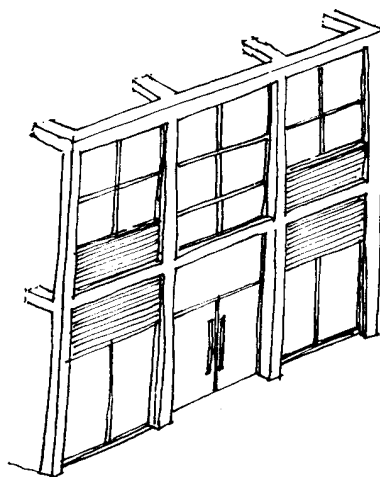
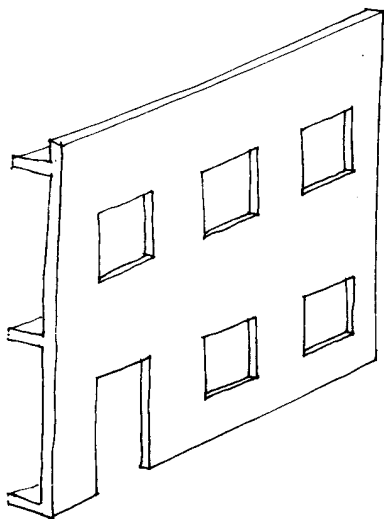
Delimitadores verticales

Se han de distinguir entre los que son exclusivamente delimitadores espaciales y los que participan en la estabilidad general del edificio. Para éstos, la cuestión clave, además de ser estables en sí mismos, es transmitir hacia el apoyo en el terreno las cargas provenientes de los elementos situados sobre ellos. Se han

de considerar como variables determinantes de su comportamiento las siguientes:

- la altura libre que han de salvar, como consecuencia de la altura del espacio que delimita,
- la importancia relativa de las aberturas, como consecuencia de las relaciones de uso, vistas o desplazamientos que se deben establecer entre los dos espacios,
- el peso que han de transmitir,
- los métodos de unión en su base y con los elementos horizontales, y,
- los posibles empujes de viento o sismo.

De las cinco variables, la más decisiva inicialmente es la importancia de las aberturas. En ningún caso encontraremos delimitadores verticales sin aberturas, de manera que éstas pasan a ser consustanciales al propio delimitador, y de su tamaño relativo se derivarán las dos soluciones habituales. Si la presencia de la abertura es pequeña, la solución puede basarse en el sistema de muro, que deberá resolver además el problema mecánico de la parte superior de la abertura mediante alguno de los procedimientos enunciados, vigas o arcos. Si la abertura es mucho mayor que la parte maciza, la solución es el elemento vertical aislado, de sección más o menos concéntrica, como las columnas o los pilares. En este caso adquiere mayor importancia su combinación con los elementos horizontales que salvan la luz a modo de vigas o dinteles.



La estructura portante

La diferenciación entre delimitadores verticales y horizontales es un método de análisis que no nos ha de hacer olvidar que en realidad todos estos elementos forman un conjunto interrelacionado que alcanza una unidad de orden superior, el propio edificio, que es el que ha de ser estable en su globalidad. Cuando se habla de condiciones de estabilidad, el análisis ha de llegar al conjunto del edificio. Y para afinar más ese análisis surge el concepto de estructura portante o simplemente estructura. Con esta palabra se entiende el conjunto de elementos que interrelacionados entre sí aseguran la estabilidad de cada uno de ellos y de todo el edificio (II-3 a II-6).

Históricamente, antes del siglo xx, los muros o paredes de obra de fábrica cumplían simultáneamente el papel de estructura y el de delimitadores espaciales verticales.



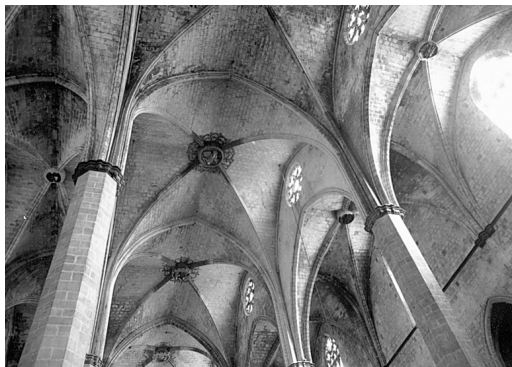
Sección de un edificio civil decimonónico (en fase de derribo parcial) que permite ver su cubierta a dos aguas y sus delimitadores horizontales resueltos con bóvedas y forjados, todos ellos apoyados en los muros de fachada, que a su vez separan del espacio exterior.



Edificio que se acostumbra considerar como ejemplo representativo de los cambios producidos en los inicios del siglo xx. Los muros quedan como en volandas sin alcanzar el suelo, los apoyos son delgados pilares y las ventanas son de formato horizontal e independientes de la estructura.

Sólo a partir de este siglo, el desarrollo definitivo del hormigón armado y el acero permite una difusión del sistema de pies derechos y se llega a la separación entre elementos portantes y delimitadores espaciales. Éstos, como consecuencia de la liberación de su carácter portante, disfrutan de una nueva libertad de forma y proporción tanto en sí mismas como de las aberturas, tal como se advierte en muchas de las propuestas innovadoras de la arquitectura de los años veinte del siglo xx, época en la que fue enfatizado este carácter no portante de la fachada como símbolo de modernidad.

No obstante, el recorrido histórico también nos muestra que las menores posibilidades formales del sistema de muros, mucho más condicionados por la estabilidad, no ha sido obstáculo para crear unos espacios de una calidad extraordinaria. De la necesidad la arquitectura hace virtud, e infinidad de ejemplos, como cualquier catedral gótica, nos lo demuestran. Cuantas menos posibilidades constructivas tenemos, más relación existe entre el sistema de estabilidad y el propio espacio. A medida que la técnica constructiva nos permite resolver cualquier luz con muy diferentes métodos, asegurando una estabilidad global sin necesidad de rellenar los espacios entre pies derechos y vigas, el espacio arquitectónico queda mucho más libre, lo cual no lleva necesariamente a hacer una mejor arquitectura.



Espacio delimitado por bóvedas de crucería y muros laterales de una iglesia gótica.

ESTRUCTURA Y VARIABILIDAD DE LOS USOS

Un concepto que conviene precisar ahora es el concepto de “uso”. El uso que se hace de un edificio coincide normalmente con el que fue pensado inicialmente, es decir, con su función utilitaria original. Pero la variabilidad de las necesidades de la sociedad hace que muy a menudo las actividades que se realizan dentro de un edificio cambien o no se desarrollen como se llevaban a cabo originalmente. Un antiguo convento se puede convertir en un museo, un edificio de viviendas en sede de una corporación, un hospital de principios de siglo puede adaptarse a las nuevas condiciones de la medicina, o, pensando en un futuro no lejano, los edificios escolares se deberán adaptar a grupos de alumnos más reducidos. También la unidad familiar está sometida a cambios importantes y los edificios de vivienda han de aportar flexibilidad frente a ellos.

Los cambios de actividad principal o de su modo de desarrollarse requieren variaciones más o menos intensas de la organización espacial para adaptarla a esa nueva función utilitaria o a un nuevo modo de uso; en unos casos se podrán realizar y en otros no. Y, precisamente, en muchos casos la posibilidad de adaptarse a un nuevo uso es la garantía de supervivencia de los edificios, lo cual es importante si forman parte de la memoria colectiva. Si el antiguo hospital no se hubiera podido adaptar a las nuevas condiciones, probablemente habría desaparecido y con él una importante señal de identidad de la colectividad.

Considerado así, el concepto de uso es más amplio que el de función y esto denota que las funciones, tanto utilitarias como de otro tipo, para las que se conciben inicialmente los edificios no son eternas, sino que muy a menudo cambian mucho antes de que el edificio apenas haya envejecido físicamente, dándose lo que se denomina obsolescencia funcional. Incluso muchas veces aparecen usos absolutamente imprevisibles.

Con objetos más pequeños, como por ejemplo una mesa, se hace más patente la diferencia entre uso y función. Es obvio que la función utilitaria de una mesa es permitir que personas sentadas a su alrededor realicen determinadas actividades como leer, escribir, comer, etc. Pero es evidente que cuando alguien se sienta encima de una mesa, como, por ejemplo, un profesor en su explicación en un aula, está haciendo un uso parecido al de las sillas. Se pueden encontrar muchos ejemplos de este tipo en la vida cotidiana y es conveniente que el profesional de la arquitectura los tenga siempre presentes cuando desarrolla su actividad creadora.



Espacio principal de un pabellón de hospital basado en los principios higienistas del siglo XIX, transformado para adaptarse a la medicina actual.

Se puede afirmar, pues, que para que un edificio sea realmente útil, además de adecuarse a la función utilitaria inicial, ha de permitir con relativa facilidad la adaptación a los cambios de uso que insoslayablemente se producirán casi desde el primer día de su existencia.

Algunos edificios antiguos, a pesar de tener su estructura portante formada por inamovibles muros de carga, permiten esta adaptación debido a que no fueron concebidos como consecuencia directa de la posible función inicial, sino con una organización espacial neutra capaz de acoger diferentes actividades sin interferir negativamente en ellas, con un cierto carácter de contenedor genérico.

A partir de la aparición de las estructuras porticadas a principio del siglo xx, la libertad de formas que adquieren los delimitadores espaciales, libres de su papel portante, permite una mayor relación entre configuración espacial y actividad a desarrollar, sin suponer una limitación en la flexibilidad para adaptarse a sus variaciones. Los delimitadores del espacio pueden variar su localización por un simple derribo y nueva construcción, o por una simple manipulación de mecanismos en los más desarrollados tecnológicamente, que permiten fácilmente su cambio de ubicación.

Pero la flexibilidad no sólo depende de la utilización de los sistemas estructurales porticados. Si se da una importancia decisiva a esta

capacidad de adaptación, no sólo es preciso olvidar la utilización de estructuras de muros, sino que se requiere organizar la forma general de todo el edificio, en especial las fachadas, de manera que permitan las nuevas ubicaciones de los cerramientos interiores. La solución habitual que se adopta para los edificios de uso administrativo fuertemente condicionados por la variabilidad de los usos es bien representativa de esa idea, cuanto más nos alejamos de esa isotropía en planta y en alzado, propia de un contenedor genérico, más difícil es la adaptación a los cambios. El diseño de la estructura ha de tener muy presente que su organización puede favorecer o impedir la flexibilidad (II-6).

CLASIFICACIÓN BÁSICA SEGÚN USOS Y ESTRUCTURAS

Con todo lo dicho anteriormente ha quedado expuesta una de las características esenciales de la arquitectura: la indisoluble relación entre usos, espacios y estructuras portantes.

Es necesario desarrollar ahora una primera clasificación de los edificios que ordene las diferentes maneras actuales de darse esas relaciones, como consecuencia de las características de nuestra cultura constructiva. Es una clasificación que surge de combinar los factores clave de la estabilidad de los elementos



Imagen típica de una fachada de edificio de oficinas que permite una gran flexibilidad en las distribuciones interiores.

estructurales, la luz y la altura (parcial o total) de los espacios que delimitan, con los diferentes usos.

Según eso, los edificios pueden ser:

1) Edificios de vivienda unifamiliar de reducido tamaño con luces y alturas reducidas. Habitualmente les corresponde el tipo estructural formado por muros, que actúan también como cerramiento, y elementos horizontales con forjados de viguetas y revoltones (II-6.1). La flexibilidad de uso no es, en general, un objetivo prioritario, y la economía de producción aconseja este tipo estructural, en la actualidad todavía algo más barato que los que se citan a continuación, lo cual no niega que éstos se puedan utilizar en ese caso.

2) Edificios de viviendas plurifamiliares de varias plantas o edificios públicos sin unos requerimientos de marcado carácter monumental. Mantenemos las luces y las alturas moderadas. En el segundo caso aparece con toda su fuerza la exigencia de flexibilidad de uso. Por esta razón y por economía de producción, la estructura habitual es la de pórticos de hormigón armado (II-6.2) en los dos casos público y privado.

3) Edificios con grandes luces, naves industriales, edificios de carácter deportivo, etc. Las luces pueden oscilar entre diez metros para los más pequeños hasta cincuenta metros o más.

Pueden existir zonas del edificio con luces moderadas que pueden resolverse mediante los sistemas anteriores. En general, las alturas de los espacios de gran luz también deben ser mayores. La estructura es el elemento dominante (II-5.3). El aumento de luz requerirá en general un aumento del canto del elemento resistente u otras soluciones como arcos de acero capaces de resistir flexiones o bien estructuras tensionadas.

4) Edificios con luces moderadas, pero con gran altura, como los rascacielos, en los que las acciones dominantes son las horizontales, como el viento, con tanta o más influencia en su estructura que la gravedad.

5) Edificios complejos que no se pueden incluir en alguna de las clases anteriores.

En todos ellos queda más o menos clara la relación entre el uso, el espacio y la estructura

cuya función inicial es ser estable a las acciones gravitatorias.

En este libro se estudian los edificios de los tres primeros tipos, ya que los de los dos últimos requieren un desarrollo complejo.

Sin duda, el primer requisito de un edificio, de todos sus elementos y, especialmente, de su estructura portante, es resistir el primer embate potencialmente destructor de la gravedad y, por esta razón, antes de entrar en el segundo objetivo fundamental, el ambiente, es imprescindible el estudio de las variables que inciden en esa estabilidad inicial y describir más en detalle las formas estructurales de las que se ha hablado en este tema, que son también consecuencia del tipo de espacio que rodean.

TEMA 2. El primer embate gravitatorio

EXIGENCIAS DE LA ESTABILIDAD INICIAL

LOS MATERIALES NATURALES Y SUS FORMAS ESTABLES

- Los muros de piedra
- Las vigas de madera
 - Indeformabilidad de las vigas*
- Las aberturas en los muros
- Las bóvedas
- Las armaduras

FORMAS ESTABLES EN HORMIGÓN Y ACERO

- Los materiales resistentes menos "naturales"
 - El acero*
 - El hormigón armado*
- Las formas "naturales" evolucionadas
- El pórtico

ECONOMÍA Y CERTEZA PREVIA DE LA ESTABILIDAD

EXIGENCIAS DE LA ESTABILIDAD INICIAL

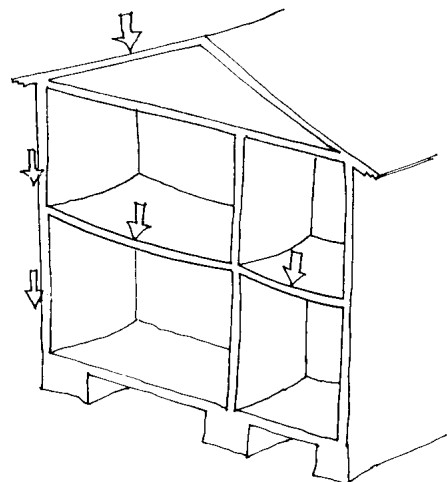
Las fuerzas que actúan desde el primer momento sobre el edificio se rigen por la ley de la gravitación universal y son consecuencia de la atracción que ejerce la masa de la Tierra sobre las masas del edificio, las de los objetos que contiene y las de los propios usuarios. Se denominan acciones gravitatorias.

Cada una de las fuerzas concretas de los elementos pesados que actúan sobre el edificio se denominan cargas. Éstas pueden ser invariables o variables a lo largo del tiempo.

Las primeras son debidas a la propia masa del edificio, prácticamente constante a lo largo de su vida, y sólo varían si se produce un cambio de distribución de tabiques o de sustitución de pavimentos u otros elementos más o menos móviles.

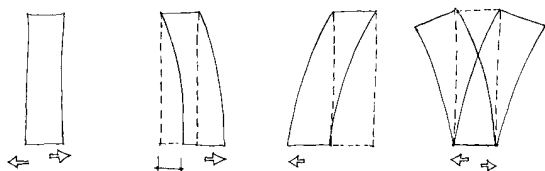
Las variables son debidas al peso del mobiliario y al de los usuarios que están o se desplazan por encima de los forjados.

Aunque con una incidencia mucho menor, no se han de olvidar otras cargas estáticas como las de nieve, que pueden influir, en determinadas zonas geográficas, en los elementos portantes de las cubiertas.

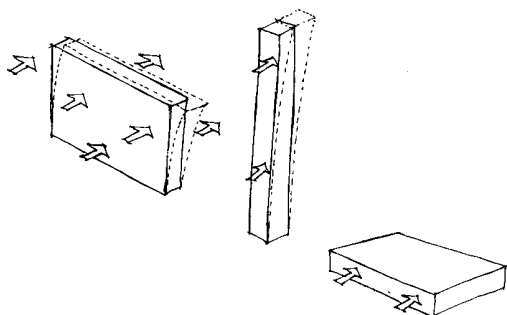


Además de las fuerzas anteriores debidas a la gravedad que actúan sin variaciones a corto plazo, sobre el edificio pueden actuar otras con carácter momentáneo, pero con efectos que pueden llegar a ser catastróficos: las debidas a los terremotos y al viento huracanado.

Las fuerzas debidas a los primeros también son función de la masa de los edificios, ya que los seísmos producen unos movimientos principalmente horizontales que, según la segunda ley de Newton (fuerza igual a masa por aceleración), generan unas fuerzas de inercia más grandes cuanto mayor sea la masa del edificio.



La fuerza del viento tiene unos efectos que dependen de su velocidad y de la forma (y no de la masa) del edificio, ya que cuanto mayor sea la superficie que presenta contra el viento y cuanto más alto sea, mayor será la fuerza de presión o de succión.



Las normativas que fijan los valores de estas acciones son el CTE-SE-AE (Código Técnico de la Edificación-Seguridad Estructural-Acciones en la Edificación) para gravitatorias y viento, y la NCSE-02 (Norma de Construcción Sismorresistente) para las sísmicas.

La existencia del propio espacio del edificio requiere que todos los elementos que lo configuran sean estables, es decir, que no experimenten ningún tipo de colapso o ruptura total o parcial como consecuencia de todas estas fuerzas que, realmente, pueden llegar a ser lo suficientemente grandes para conseguir-

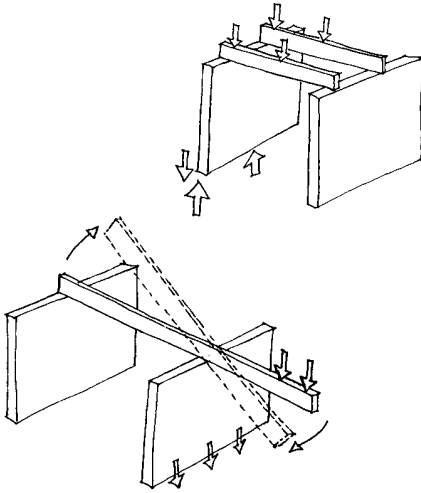
lo. Es decir, del principio de la adecuación del espacio se deduce el requisito de estabilidad global del edificio y parcial de sus elementos.

Se puede distinguir entre la estabilidad inicial y la que sólo se comprueba a largo plazo. La primera es la que han de tener todos los edificios en el mismo momento de su construcción frente a la fuerza de la gravedad. Nadie la pone en duda. Pero se acostumbra dudar de que pueda producirse un huracán o un terremoto suficientemente potentes como para destruir nuestro edificio. Si queremos hacer edificios que se mantengan íntegros durante muchos años, es obligado considerar estas acciones, ya que, si bien son poco probables en un período corto de tiempo, cuando el lapso es muy largo, la probabilidad se convierte en casi certeza.

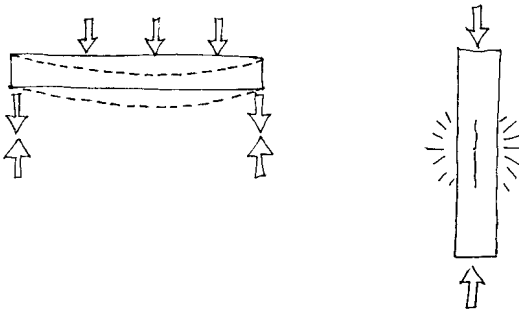
La acción que más influencia tiene y ha tenido siempre en la generación de las formas arquitectónicas delimitadoras del espacio, dada su mayor intensidad y su implacable presencia en todo el globo terrestre, es la de la gravedad. Lo cual justifica su estudio preferente en este capítulo, en especial por sus efectos inmediatos sobre los elementos del edificio. En I-10 se presta atención a las fuerzas horizontales, que pueden poner en peligro la integridad del edificio, así como, en I-11, el efecto a largo plazo de la gravedad como posible causante de deformaciones que también pueden afectar a esa integridad. En este tema se exponen aquellas variables que más relación tienen con la configuración de los espacios, y en II-3 a II-6 se detallan los diversos elementos y sistemas que deben considerarse en un estudio completo de la estabilidad.

La estabilidad inicial de un edificio obliga al cumplimiento de dos exigencias básicas. La primera, que a toda acción consecuencia de la gravedad le debe corresponder una reacción de la misma intensidad y sentido contrario, de manera que la primera quede equilibrada. Y la segunda, que todo elemento o parte de él que quede situado entre ambas fuerzas debe permanecer indeformado o casi.

La primera exigencia se cumplimenta con una forma general del conjunto de todos los elementos, de manera que se produzca el equilibrio estático bajo la acción de las cargas gravitatorias y de las reacciones en todos los apo-



yos, incluyendo los que transfieren las cargas al terreno. La segunda, que afecta a cada uno de esos elementos y sus partes, se resuelve con una forma y un material adecuados que les confieran la capacidad de no deformarse demasiado y, por supuesto, no romperse. Es decir, cada elemento por sí mismo ha de presentar rigidez y resistencia a la rotura. La rigidez, además de la forma, también depende de una característica intrínseca del material que se denomina módulo de Young (I-11).



LOS MATERIALES NATURALES Y SUS FORMAS ESTABLES

Los muros de piedra

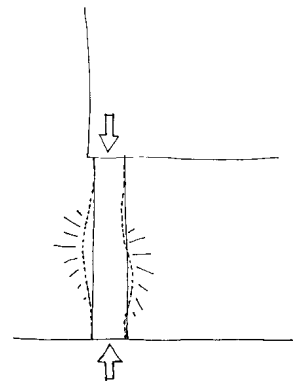
La condición básica para que un edificio sea estable es que el terreno en el que se apoya, y que recibe todo el peso del edificio, no se deforme excesivamente y por supuesto que no

se hunda o quiebre, es decir, que sea capaz de oponer una reacción igual a la acción del edificio sobre él.

Supongamos que tenemos un terreno rocoso capaz de no romperse incluso para pesos mucho mayores que el de nuestro edificio. Es razonable imaginar que dicho terreno ha pasado por etapas en su historia geológica en que sobre él se han producido compresiones por acciones gravitatorias debidas a otras masas de tierra o material mucho más considerables que las que nosotros podamos ejercer mediante el peso de nuestro edificio. En general, eso es lo que ocurre cuando tenemos la suerte de poder construir sobre un terreno rocoso.

Por esa misma razón se ha utilizado siempre la piedra como elemento básico de la construcción. Cualquier pieza escogida en la cantera entre las partes que no están afectadas por el contacto con el aire se puede considerar que es el resultado de un "proceso de fabricación" en el que las acciones gravitatorias han comprimido y compactado ese material hasta darle una gran resistencia a la rotura. La piedra es el primer material resistente que encontramos en la naturaleza.

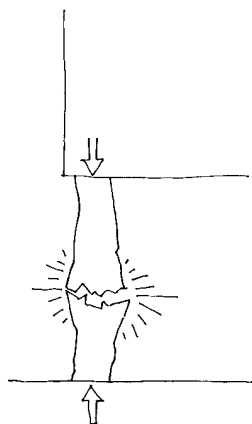
Supuesto el terreno resistente, la estabilidad depende del primer elemento del edificio apoyado en ese terreno, el muro o pilar de planta baja, que en su parte superior recibe toda la carga que transmite el edificio. Está trabajando



a compresión. Por efecto de la carga tiende a acortarse. Al conjunto de dos fuerzas iguales y opuestas que actúan sobre cada una de las "rebanadas" en las que podemos imaginar sec-

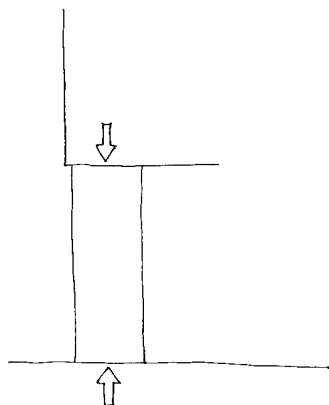
cionado el elemento se le denomina esfuerzo, y en este caso de compresión, ya que son dos fuerzas que tienden a acercarse entre sí y acortar el elemento.

Supongamos que este muro o pilar, idealmente formado por una sola pieza, es bastante grueso y poco esbelto. Puede ocurrir que se

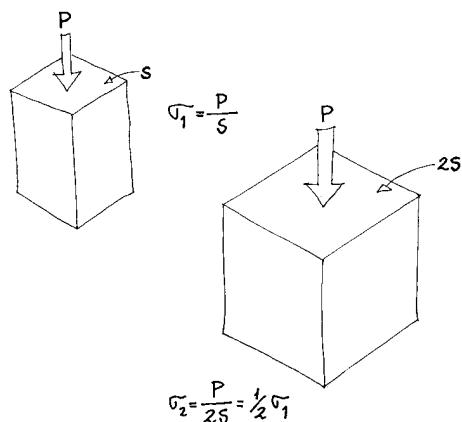


rompa por un exceso de carga. A este fenómeno lo denominaremos rotura por compresión y es consecuencia del exceso de carga que lo comprime.

Si esto nos ocurriera en un edificio, en su reconstrucción utilizaríamos un muro más grueso con la esperanza de que siendo más grueso resistiera. Éste es el mecanismo que se utilizó



en la Antigüedad para precisar las dimensiones de los elementos constructivos, el ensayo y error. La experiencia demuestra que cuanto mayor es la sección del elemento más carga puede aguantar. El cociente entre la carga y la



superficie nos permite precisar mejor el fenómeno, y lo denominaremos tensión, en este caso por compresión, y habitualmente se expresa con la letra griega sigma minúscula.

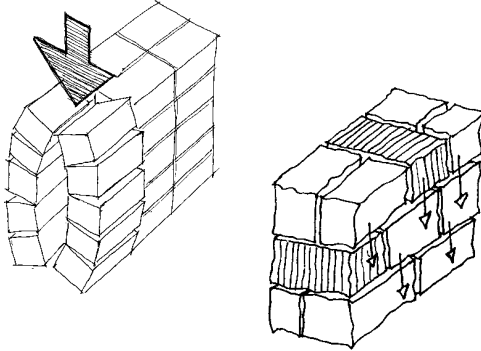
La tensión máxima que puede recibir un elemento justo antes de romperse es su resistencia a compresión. Cada material tiene su propia resistencia por compresión como consecuencia de su estructura molecular. Sabemos por ensayos realizados en laboratorio que los materiales pétreos pueden llegar a resistir en cada centímetro cuadrado bastantes centenares de kilos.

Volvamos a nuestro muro. En pocas ocasiones en realidad sometemos estos elementos a unas cargas tan extraordinarias, y sin embargo se rompen. Las causas son diferentes a la falta de resistencia y pueden ser diversas; sin ánimo exhaustivo, veremos las que más influyen en la configuración de estos elementos.

En realidad, en pocas ocasiones vamos a poder realizar muros o pilares tan ideales como el visto anteriormente formado por una sola pieza. Por razones económicas, los elementos pétreos que podemos extraer de las canteras siempre son de reducidas dimensiones. La construcción habitual se basa en procedimientos que mediante la agregación o adición de estos elementos de reducido tamaño consiguen muros de dimensiones normales (I-14).

La primera causa por la cual puede romperse un muro es precisamente que ese proceso de adición no se ha realizado convenientemente. Cualquier muro de piezas sometido a

la acción de una carga considerable experimenta unas deformaciones transversales que si no quedan contrarrestados por la disposición interna de las piezas puede llegar a romper el muro en vertical, como se ve en la figura. Si es así, el muro no necesita más resistencia sino



una disposición astuta entre sus partes. Éstas deben contar con impedimentos para moverse entre sí, deben estar trabadas o disponer de un gran rozamiento entre ellas y una coherencia transversal que se consigue mediante las piezas, denominadas perpiaños o tizones, que atraviesan el muro de lado a lado (rayado en la figura).

Pero, además, para conseguir que cualquier carga que actúe sobre una de las piezas se reparta entre todas las demás y también que un muro sea coherente en el sentido longitudinal, es necesario ir colocando las piezas sobre las juntas verticales que han dejado las dos inferiores. La disposición de las piezas entre sí se denomina aparejo.

Cuanto más irregulares sean las piezas con que construimos, más importante es su correcta colocación. Si son piezas ortoédricas, la dificultad será mucho menor.

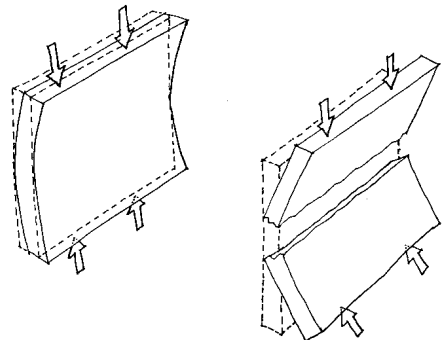
Esta es la ventaja que presentan los ladrillos respecto a la construcción en piedra no escuadrada.

El ladrillo es uno de los primeros materiales históricos de construcción elaborados por el hombre. Se consigue por la cocción de masas ortoédricas de reducido tamaño de pasta de arcilla, es decir barro, que se someten a altas temperaturas en los hornos de cocción; con ello se consigue un material artificial, con pro-

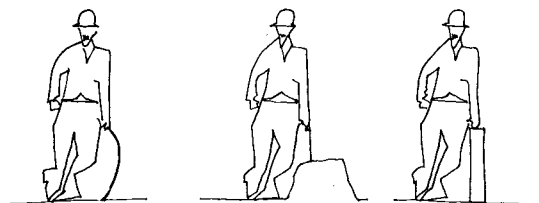
iedades muy parecidas a las de la piedra en cuanto a resistencia a compresión pero mucho más fácil de trabajar (I-13).

El material que consigue adaptar y ligar más entre sí las irregulares piezas de piedra o de ladrillo es el mortero, que está formado por un conglomerante como la cal, arena y agua (I-13). El mortero tiene la extraordinaria propiedad de que en su momento de fabricación es amorfo, es decir, no tiene forma, y se adapta al recipiente que lo contiene. Ello nos permite colocarlo en los intersticios de los elementos de piedra o ladrillo. Con el paso del tiempo se endurece y adquiere resistencia hasta convertirse casi en piedra, de manera que el conjunto de piedras, ladrillos y mortero llega a tener una gran coherencia, resistencia y rigidez. A modo de referencia general se puede decir que una fábrica de ladrillo puede resistir entre 10 kg/cm^2 las más flojas y 100 kg/cm^2 las más resistentes. Las de piedra pueden oscilar entre un valor mínimo similar y un máximo de 200 kg/cm^2 en el caso de las piedras más resistentes (granito, etc.) bien escuadradas y colocadas sin mortero con las juntas muy bien trabajadas. Pero las tensiones previsibles cuando se proyecta un elemento con estas fábricas han de ser bastante inferiores como medida de seguridad y normalmente no han de sobrepasar esas cantidades divididas entre 2,5.

Suponiendo que tenemos el muro perfectamente organizado, en piedra o en ladrillo, y no se producen roturas de disgregación, siguen existiendo otras maneras de producirse la rotura. Una de las más importantes es el pandeo que se produce en muros delgados. La rotura se produce por su flexión en su propio plano.



El pandeo es el fenómeno por todos conocido que se produce cuando nos apoyamos en una caña delgada; si tomamos una más corta con el mismo peso de nuestro cuerpo no seremos capaces de deformarla, sin embargo, si es muy esbelta, la rotura se produce por esa flexión. Si cogemos otra caña de mayor longitud



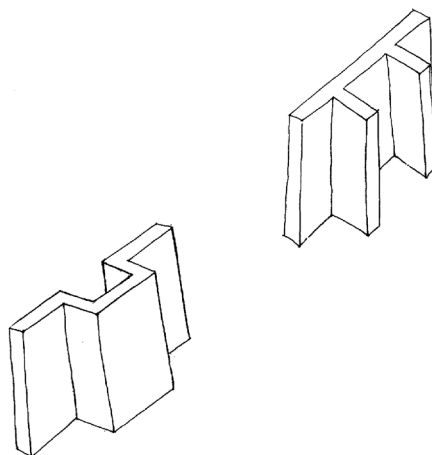
pero mayor sección, el esfuerzo deberá ser mayor. La capacidad de no romperse por el efecto del pandeo también depende del grosor. La clave es la esbeltez de la caña o elemento constructivo, es decir, el cociente entre su longitud y su grosor o espesor.

En resumen, las condiciones para la estabilidad de un elemento que ha de soportar las cargas verticales y transmitir las al terreno se concretan en que sea resistente a compresión y suficientemente grueso en relación a la altura del espacio que configura para no romperse por efecto del pandeo.

Por ejemplo, si construimos un muro de treinta centímetros de grueso y cuatro metros de altura, con ladrillo y mortero bien resistentes, podremos soportar con absoluta tranquilidad la carga proveniente de cuatro o cinco pisos de viviendas. Ahora bien, como son viviendas, hemos de cerrar los espacios mediante compartimentaciones. Éstas podemos hacerlas también con paredes resistentes entrelazadas entre sí y,

en este caso, es posible que el muro de treinta centímetros se pueda reducir a quince, ya que mediante las dos paredes que lo confinan hemos reducido su tendencia a deformarse por pandeo.

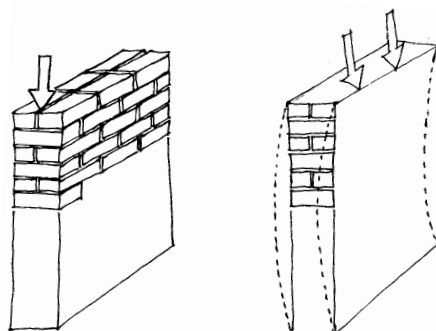
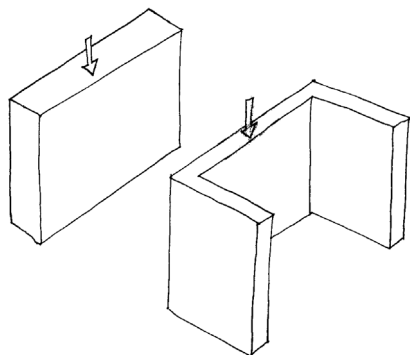
De manera que el grosor no es la única defensa contra el pandeo, sino también las formas que evitan la pared continua y esbelta, como pueden ser las paredes en zigzag u otras formas semejantes. Todas estas paredes tienen



una capacidad portante, por ser indeformables a pandeo, mucho mayor que la misma pared recta o sin contrafuertes.

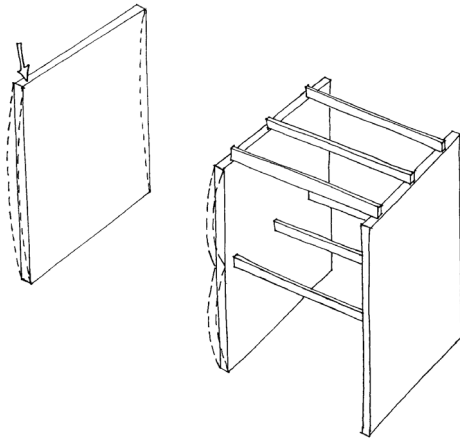
Como se ve, la configuración del espacio y las estrategias contra el primer embate están totalmente interrelacionadas.

Por último se ha de hacer referencia a una tercera causa de rotura del muro: la excentricidad de la carga. En el caso de que la carga esté situada justo en el eje del muro, nos encontra-



mos en la situación más favorable, porque si el aparejo es correcto, conseguiremos distribuir la carga entre toda la sección y, en consecuencia, las tensiones serán todas iguales. Por contra, si esta carga actúa lateralmente, esta distribución será irregular y la sección que esté debajo de la carga tendrá una tensión mayor que el resto. Si la carga está todavía más desplazada, puede ocurrir que sólo una sección reciba la compresión, e incluso pueden llegarse a formar flexiones muy similares a las producidas por el efecto del pandeo. El método para evitar estos efectos desastrosos, lógicamente, es la correcta disposición geométrica mediante la coincidencia de los ejes de todos los elementos que carguen sobre el muro, lo cual muchas veces no es fácil de conseguir.

Si al hacer un edificio queremos aprovechar más la ocupación del terreno, es imprescindible la utilización de los elementos horizontales, los denominados forjados, que resuelvan el soporte de las nuevas plantas. Más adelante entraremos en ellos a partir del concepto de



viga. Pero ahora es más interesante destacar el papel que pueden llegar a tener como estabilizadores de las paredes que se hacen cada vez más esbeltas a medida que el edificio adquiere más altura. Los forjados, si están bien unidos con las paredes, cierran las cajas en el sentido horizontal y limitan la longitud de pandeo a la altura libre entre ellos. Esta conjunción de paredes y forjados entre sí es lo que ha permitido a lo largo de la historia y en la actualidad la cons-

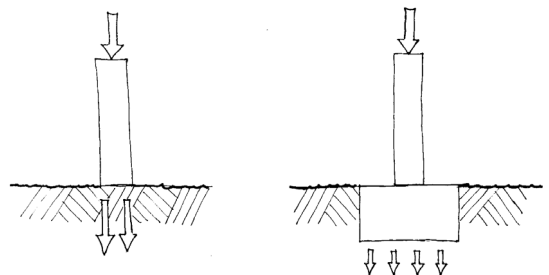
trucción económica de estructuras de muros de varias plantas.

Si el edificio que hemos de construir es unifamiliar de poca altura, el sistema de paredes de carga habitualmente es el más económico ya que, además, actúan como cerramiento exterior e interior que van ligándose entre sí formando lo que se entiende como una estructura de cajas, y con ello aprovecharemos al máximo las capacidades resistentes a compresión de las propias paredes ya que hemos reducido mucho el riesgo de romperse por pandeo. El sistema de cajas, además, es muy estable frente a las dos acciones que quedan por considerar de momento, el viento y el sismo; de ahí su éxito a lo largo de la historia. Ha sido el sistema constructivo de todo tipo de viviendas hasta bien entrado el siglo xx (II-6.1).

Tal como se comenta en I-1, si las aberturas han de ser mucho mayores que la parte maciza, la solución habitual pasa por la utilización de columnas o pilares, que tienen un origen histórico bien remoto, como lo demuestra el propio templo griego.

Las condiciones de estabilidad de estos pilares o columnas son muy similares a las de las paredes. Están sometidos a unas tensiones de compresión que han de resistir y si son muy esbeltas pueden romperse por la flexión lateral del pandeo. Sin embargo, al ser elementos aislados, no pueden disponer de la ayuda de otros elementos, lo que les obliga a tener por ellos mismos el grosor suficiente para evitarlo.

Ahora es el momento de volver hacia atrás y recordar lo que se dijo del terreno, con tal de no olvidar un elemento básico para el funcionamiento de muros y pilares, la cimentación. La rotura del terreno en parte es similar a la que



hemos denominado antes por compresión. Existen diferencias, pero no es preciso destacarlas ahora. Si se produce la rotura es por un exceso de la tensión de compresión que como ya sabemos se reduce si aumentamos la superficie entre la que se distribuye la carga. Si el terreno es más débil que una roca, lo cual ocurre casi siempre, deberemos aumentar la superficie de contacto con él hasta llegar a una tensión de compresión bastante inferior (normalmente la tercera parte) a su tensión de rotura como medida de seguridad y ese es el papel que asumen los cimientos, que no son sino ensanchamientos de los muros o los pilares en su contacto con el terreno (II-3 y II-3.1).

Las vigas de madera

La anterior referencia al templo griego puede servir para pasar de la piedra al otro gran material natural: la madera. Según un viejo mito, la columna de la arquitectura griega clásica fue la trasposición a la piedra de columnas realizadas con troncos de árbol trabajados hasta conseguir un aspecto bastante parecido al que posteriormente fue de piedra y que es el único que ha llegado a nosotros. Independientemente de que este mito fuera cierto o no, es fácil comprender que la madera puede tener una utilización similar a la de la piedra en columnas o pies derechos siempre que las cargas no sean excesivas, ya que su resistencia a compresión es inferior a la de la piedra.

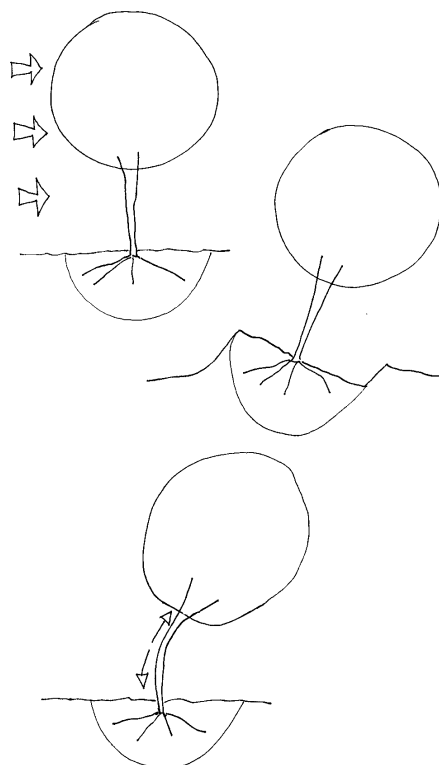
Pero si la madera se ha utilizado y se utiliza tan profusamente no es por su resistencia a compresión, sino por su resistencia a romperse por el efecto contrario, por tracción.

La tracción es el efecto que se produce en una cuerda cuando un peso pende de ella. Si no hay rotura, se produce el equilibrio entre la acción de la gravedad y la reacción que aporta un gancho fijado en el techo, por ejemplo. Es un esfuerzo, o dos fuerzas, que tiende a alargar los cuerpos. Al igual que ocurre con la compresión, cuanto mayor sea la sección de la cuerda más aguantará antes de romperse. El cociente entre la carga y la superficie se denomina tensión de tracción, y la tensión que se alcanza justo antes de romperse, resistencia a tracción.

La razón por la que la madera es muy resistente a tracción se puede deducir de la observación de su origen natural, que no es otro que un larguísimo proceso evolutivo darwiniano.

La clave del sistema vital de los árboles se basa en la extraordinaria superficie que mediante sus hojas permite conectar su organismo vital con el aire y el sol. Pero esa misma superficie situada a cierta altura sobre el terreno es, al igual que la vela de un barco, susceptible de oponerse al avance del viento. Si un viento huracanado ejerce una fuerza mayor que esta oposición, algunas ramas y en casos extremos el árbol pueden quedar destruidos. Se ha de entender, en consecuencia, que los árboles son estructuras que han progresado evolutivamente por ser resistentes a la acción más potente que pueda destruirlos, el viento huracanado, que puede venir de cualquier dirección y, por ello, disponen de una estructura concéntrica que les permite ser resistentes venga de donde venga aquella fuerza natural.

La figura muestra la deformación, por todos conocida, que adoptan los árboles frente



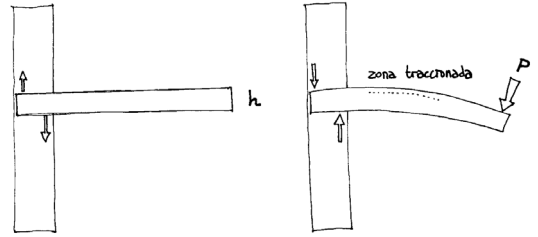
a un fuerte viento. Su estabilidad depende de dos factores. El primero, su enraizamiento en el terreno, que en términos constructivos se denomina empotramiento. Es una unión que impide que el árbol vuelque frente al empuje del viento, dado que implica a una masa de terreno importante cuyo peso equilibra la fuerza de arranque de aquél.

Segundo, supuesto enraizado, el tronco no debe de romperse por tracción debido a la curvatura y estiramiento de uno de sus lados producida por el viento. Pues bien, por su propia naturaleza, los troncos son elementos muy resistentes a tracción y, por supuesto, algo a compresión, ya que, si bien el peso propio de los árboles siempre es reducido, no puede despreciarse.

Nuestra experiencia también nos permite ver que cuando deja de actuar el viento los árboles vuelven a su primitiva posición vertical y ésta es una característica esencial para cualquier estructura que pretenda sobrevivir a situaciones excepcionales o cambiantes: recuperar siempre la forma inicial, lo cual es extensivo a cualquier elemento de construcción que pueda estar sometido a acciones variables como la del viento o a cargas variables como los usuarios andando por encima de él. Esta capacidad de recuperar la forma inicial después de haber desaparecido la carga que lo ha deformado se denomina elasticidad, y los materiales que la poseen son materiales elásticos. Es evidente que los árboles son estructuras hechas con materiales elásticos. Ya han aparecido a lo largo de esta exposición dos materiales de construcción que no poseen esta propiedad: el barro y el mortero en sus etapas iniciales; gracias a ello, a no ser elásticos sino todo lo contrario, ser plásticos, podemos darles la forma que nos conviene, bien para hacer el ladrillo o bien para rellenar los intersticios entre las piedras y los ladrillos ya cocidos. Una vez dada la forma, mediante el proceso de cocción en el ladrillo o de fraguado en el mortero, adquieren esa capacidad de deformarse muy poco, o rigidez, y de recuperar la forma inicial, o elasticidad.

Siladeamos la figura del árbol y la ponemos horizontal nos podemos imaginar que es una viga empotrada en un muro al igual que el

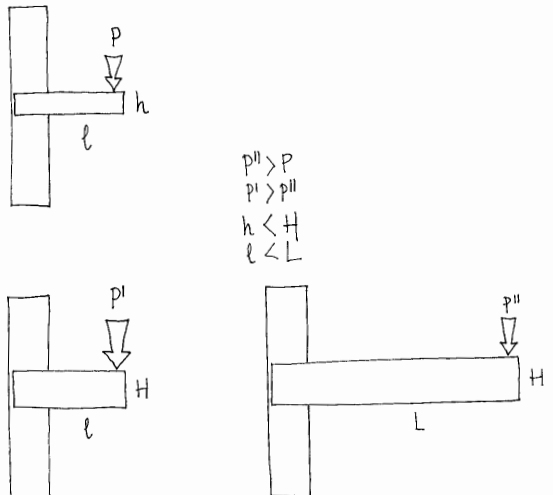
árbol está enraizado en el terreno. La viga empotrada actuará como una palanca con punto de apoyo en la parte inferior de su contacto



con el muro, y será capaz de elevar la parte opuesta del muro, lo cual exige que el peso de este sea suficientemente elevado.

Supuesto que es así, el árbol o la viga quedará sometido a la acción de la gravedad de su propio peso, u otro que podamos añadir, de manera equivalente a la que ejerce el viento. Si la carga aumenta, la viga se deformará igual que el árbol, pudiendo llegar a la rotura por tracción de la parte estirada de la viga. Este tipo de deformación se denomina flexión y se produce en el elemento a la vez una tracción en la cara que se alarga y una compresión en la que se acorta.

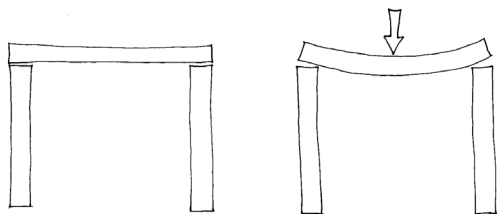
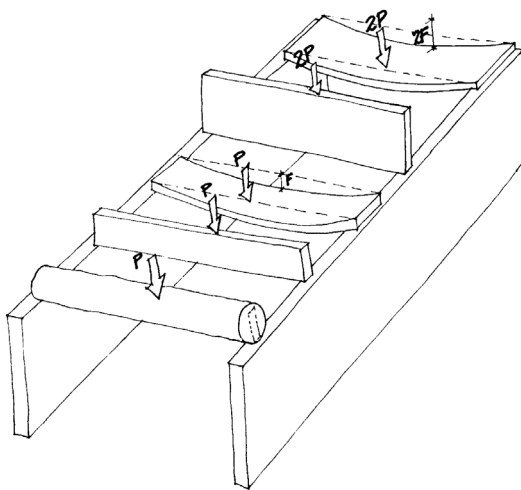
Si queremos incrementar la carga situada encima de la viga, al igual que sabemos que el árbol más grueso resiste mejor el empuje del viento, deberemos aumentar el grosor de la



viga, y lo mismo tendremos que hacer si queremos aumentar su longitud. Los árboles más altos son los que tienen que resistir más, y por ello deben aumentar su diámetro.

En realidad, las vigas empotradas anteriores sólo nos son útiles si queremos construir un elemento en voladizo, como un balcón o una tribuna. Es mucho más usual querer resolver los pisos o forjados horizontales que nos permiten realizar varias plantas. Si la viga se apoya en las dos paredes, en realidad no es necesario que se produzca un empotramiento, ya que es una disposición totalmente estable en sí misma.

Si la viga empotrada es resistente, también lo será si está apoyada en dos paredes. El efecto que producen las cargas sobre ellas será también muy similar a una doble flexión por



empotramiento invertida. La parte inferior es la traccionada y la que romperá si aumenta la carga. Si es así, para evitarlo habrá que aumentar el grosor de la viga, al igual que si se aumenta la separación entre la paredes, es decir la luz del espacio cubierto o crujía o la longitud de la viga.

Indeformabilidad de las vigas

Pero de las vigas de madera no sólo hemos de conseguir que no se rompan, sino también que caminando por encima de ellas no se deformen excesivamente, ya que puede producir serios inconvenientes para la marcha, que es uno de los fines principales de los forjados o planos horizontales. Veamos de qué depende esa capacidad para no deformarse, que se denomina rigidez.

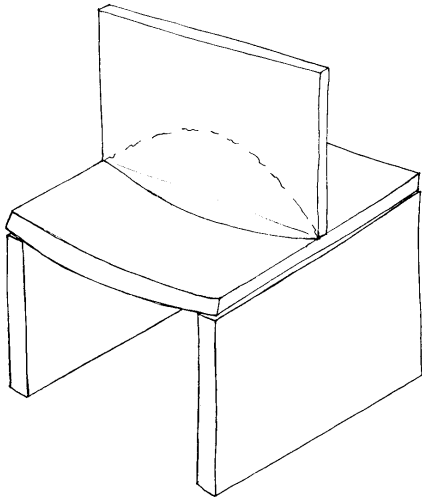
Tomemos el tronco de árbol anterior y cortémoslo tal como se ve en la figura en forma de prisma. Si comparamos su flexión con la que para el mismo peso tenía el tronco, la diferen-

cia es prácticamente nula, pero es más fácil de trabajar y de aspecto más agradable.

Pero si colocamos la misma viga de costado, veremos que la deformación es mucho mayor. Si hacemos la prueba con una viga de un canto mucho mayor e igual anchura, para el mismo peso y la misma luz, veremos que la deformación es mucho menor. Pero si esta misma viga la colocamos tumbada, la deformación será prácticamente igual que la anterior también tumbada. Sin entrar en la fórmula que matemáticamente relaciona la flecha con todas las propiedades geométricas de la viga (I-11), sí se puede afirmar que existe una relación proporcional entre el canto o altura de la viga y su deformación.

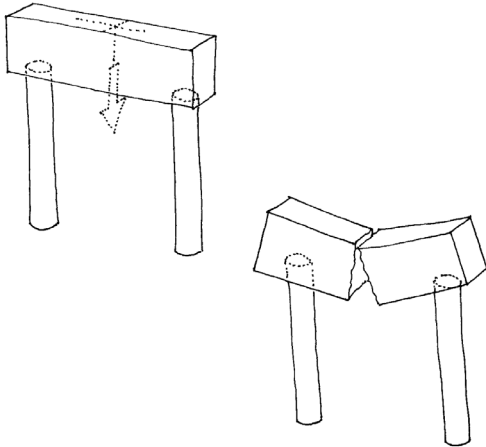
La rotura de una viga es el caso extremo de la deformación cuando las fibras no pueden soportar la longitud que han de adquirir y se rompen, de manera que una viga de mayor canto también es más segura o es más cierto que no se romperá si no aumentamos excesivamente la carga. Esto es una ventaja para la seguridad cuando andamos por encima de unas vigas de madera. Si se deforman poco sabemos seguro que van a aguantar, y que sólo se romperán cuando realmente ya estén muy deformadas.

Pero también es importante que no flechen las vigas si se construyen sobre ellas tabiques delgados y rígidos como los de ladrillo en panderete, ya que, al no poder deformarse de igual



manera, se romperán produciéndose fisuras o grietas que harán inservible el tabique (I-11).

Los bloques de piedra también pueden trabajar como si fueran vigas, por ejemplo en el templo griego, pero la mayor carga que van a recibir va a ser su propio peso, ya que la piedra es bastante más densa que la madera. La piedra a flexión se comporta de otra manera, ya que mucho antes de deformarse ante

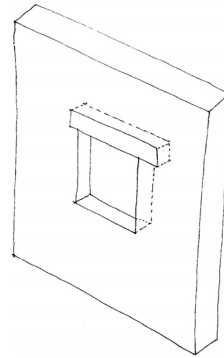


nuestros ojos, se rompe. Su rigidez es mucho mayor que, proporcionalmente, su resistencia a tracción. Si queremos evitar la rotura, la regla es la misma: a mayor canto, mayor capacidad para no romperse.

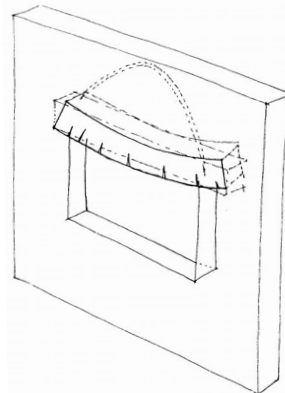
Las aberturas en los muros

Sabiendo ya cómo podemos franquear o cubrir un espacio mediante vigas resistentes y suficientemente rígidas a flexión, volvemos a los elementos verticales, en los que han quedado algunos problemas sin resolver, entre ellos, cómo aguantar la parte de muro que debe sostenerse encima de las aberturas que, indefectiblemente, han de aparecer en los delimitadores del espacio verticales.

Una aplicación de las vigas es precisamente colocarlas encima de las dos jambas de la abertura para que soporten la parte superior del muro. Una viga en esta situación se denomina dintel.

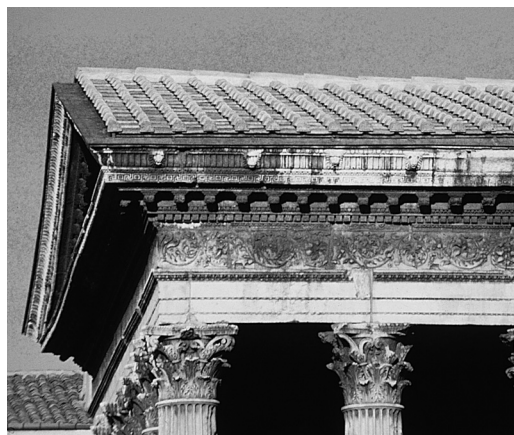


Si las aberturas son mucho más grandes, deberemos aumentar el canto del dintel. Pero no puede deformarse lo más mínimo, ya que, si es así, el muro se rompe de manera parecida al anterior tabique, formando unas fisuras que indican una manera de organizarse por sí



misma la estabilidad de la fábrica que se denomina arco de descarga; volveremos a tratar de ello unas líneas más adelante.

Si volvemos al templo griego, podremos observar que en la parte superior y apoyándose en dos columnas aparecen los bloques de piedra que actúan de una forma equivalente a lo que antes hemos denominado dintel, pero que en este caso se llama arquitrabe. El límite del sistema es precisamente la distancia entre las columnas, que por ser piedra no puede ser muy grande.

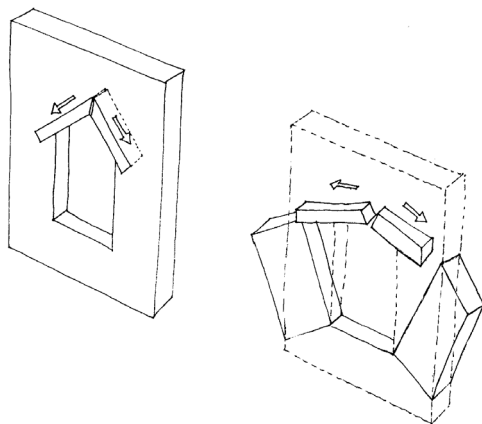


La separación de las columnas está condicionada por la reducida capacidad de trabajar a flexión de los arquitrabes.

Las proporciones de los templos griegos siempre tuvieron en cuenta esta clara limitación de la piedra, porque si no hubiera sido así no hubieran llegado hasta nosotros.

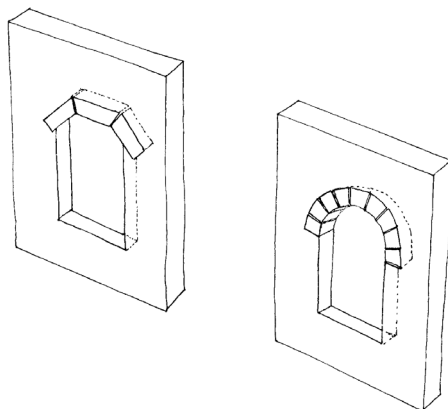
Volvamos al efecto mencionado anteriormente del arco de descarga. En realidad, ¿qué ocurre si por accidente o cualquier fallo imprevisto el dintel de madera que hemos colocado encima de la ventana se rompe? De hecho, no se hunde todo el muro que está en la parte superior, sino más o menos una porción de él en forma de triángulo o de segmento circular que acompaña a la flexión del dintel.

Estos efectos nos permiten ver que existen otras formas para resolver el franqueo de la luz de la abertura, por ejemplo, colocar dos maderos inclinados que trabajarán no como una viga a flexión sino como dos puntales que transmiten las cargas a los laterales de las aberturas.



Si estos dos laterales son suficientemente anchos, el sistema será estable. Si los dos laterales son estrechos, probablemente los empujes que ejercen estos maderos inclinados los derribarán.

Podemos colocar un madero horizontal corto achaflanando el vértice y repetir la operación varias veces hasta formar un polígono que cuando alcanza la forma de semicírculo se convierte en un arco. El arco tiene como particularidad esencial el hecho que sus piezas no trabajan a tracción, sino que todas ellas trabajan a compresión, siempre que los dos laterales

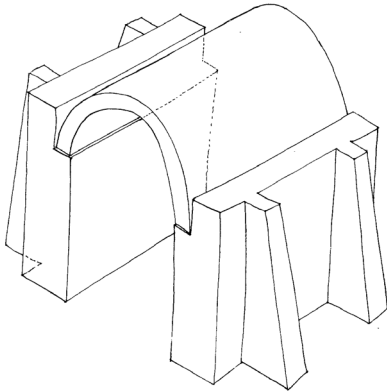


donde se apoya el arco sean suficientemente potentes para soportar la carga que les transmite el arco. De ahí que podamos utilizar para resolverlo el material con resistencia a compresión por excelencia como es la piedra o bien incluso el ladrillo, como ya se encargaron de demostrar en toda su arquitectura los romanos hace más de 2000 años.

Las bóvedas

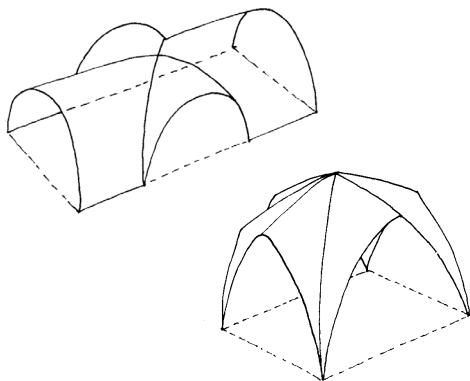
Para completar los sistemas con los que se puede resolver el franqueo del espacio falta añadir las bóvedas.

Si son como un arco de mucha profundidad, de piedra o ladrillo, forman la denominada



bóveda de cañón, que, al igual que el arco, requiere que sus empujes queden contrarrestados por muros muy gruesos, o de menor grosor si se ayudan de contrafuertes. Este tipo de bóveda fue utilizada por la arquitectura románica.

En la historia se diseñaron otros tipos de bóveda, como la de arista, que se obtiene por intersección de dos cañones de medio punto, y la de crucería, que resulta de la intersección de cañones de perfil apuntado u ojival y que, en vez de muros, necesitan sólo cuatro contrafuertes de apoyo para equilibrar sus empujes. A lo largo de los siglos xi al xvi, el desarrollo de la de crucería fue muy notable, dando lugar a la



arquitectura gótica, en la que los empujes de las naves centrales se transmiten, en muchos casos, por encima de naves laterales a los contrafuertes mediante los arbotantes.

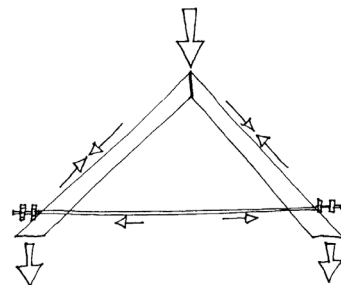


Los arbotantes reciben las cargas de los arcos interiores de la nave y las transmiten a los contrafuertes.

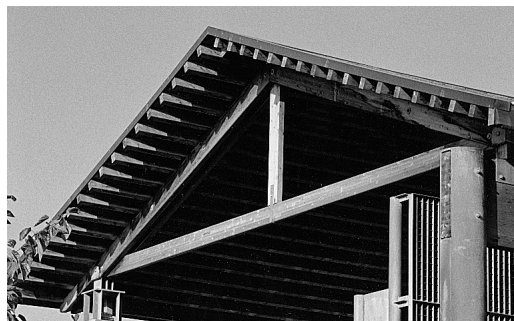
En la actualidad, las bóvedas, como elementos estructurales, se utilizan poco.

Las armaduras

Volvamos a la figura del dintel en forma de triángulo. Hemos dicho que si los laterales del muro son débiles pueden llegar a romperse por efecto de las cargas inclinadas. Una manera de evitarlo es unir mediante una cuerda, un cable u otra pieza de madera los dos extremos de los puntales cerrando el triángulo. Si es así podremos comprobar que sometido a carga el triángulo en su vértice superior, provoca unas cargas por compresión por los dos lados inclinados y unas a tracción en el elemento horizontal, pero las cargas que transmiten los apoyos son totalmente verticales.



Esto es lo que se comprueba también cuando se intenta realizar la estructura de soporte de una cubierta que, como veremos en el tema siguiente, requiere una inclinación para expulsar el agua de lluvia. Si colocamos dos vigas o un conjunto de vigas que forman el tejado y las unimos en su parte inferior, habremos obtenido una estructura estable que sólo requiere dos paredes de apoyo no excesivamente gruesas ya que no se producen empujes.



Armadura de par y pendolón sobre la que se apoyan una buena cantidad de correas.

Si nuestro edificio es más grande, se utilizan las denominadas armaduras, que son conjuntos de triángulos unidos entre sí, todos ellos indeformables y, en consecuencia, su conjunto también, y que solamente producen cargas verticales sin ningún tipo de empuje (II-5.3).

Con todo lo anterior hemos hecho un recorrido por la construcción basada en la utilización de materiales naturales resistentes a compresión, piedra y ladrillo, y sólo uno con resistencia a tracción, la madera.



Armaduras de acero en espera de que se monten las correas que han de soportar el material de cubierta.

La diferencia entre la arquitectura del pasado y la del presente, entre otras muchas causas, se debe al desarrollo y difusión de un material extraordinariamente resistente a tracción y de uso restringido en la antigüedad: el acero. Su difusión como material autónomo se inicia de forma fulgurante durante el siglo XIX y combinado con el hormigón en el siglo XX.

Es preciso dedicarles a los dos, acero y hormigón armado, una cierta atención, antes de pasar a describir el último elemento estructural básico que prácticamente sólo puede realizarse con estos dos materiales, el pórtico.

FORMAS ESTABLES EN HORMIGÓN Y ACERO

Los materiales resistentes menos “naturales”

El acero

Su estructura molecular le confiere unas extraordinarias resistencias mecánicas a tracción y a compresión. Se puede presentar en el mercado en forma de cable, redondo o perfil laminado. El primero sólo puede trabajar a tracción, por ejemplo, los cables de los que cuelgan los ascensores o los puentes colgantes. El redondo puede trabajar a tracción y a compresión, pero su utilización queda limitada a su participación en el hormigón armado. En el tercer caso se utiliza simultáneamente para absorber tracciones y compresiones, es decir, trabaja a flexión.



Perfiles de acero habituales en las obras actuales.

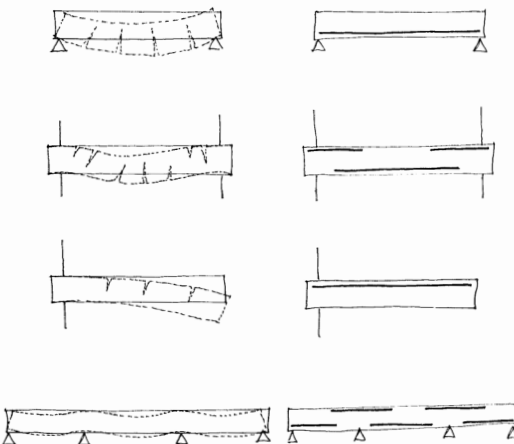
Además de su resistencia, la otra ventaja básica es la posibilidad de conseguir el máximo aprovechamiento del material mediante la forma del elemento más conveniente para trabajar a tracción, a compresión o a flexión. En este caso es la doble T, que es la forma habitual de las vigas de acero (I-13).

El hormigón armado

El hormigón está compuesto de cemento portland, áridos (grava y arena) y agua (I-13). Una vez fraguado, la estructura interna es muy compacta debido a la combinación de los diversos formatos de los áridos adheridos entre ellos por el cemento portland. Esto lo convierte en un material pétreo, es decir, tiene alta resistencia a compresión y baja a tracción.

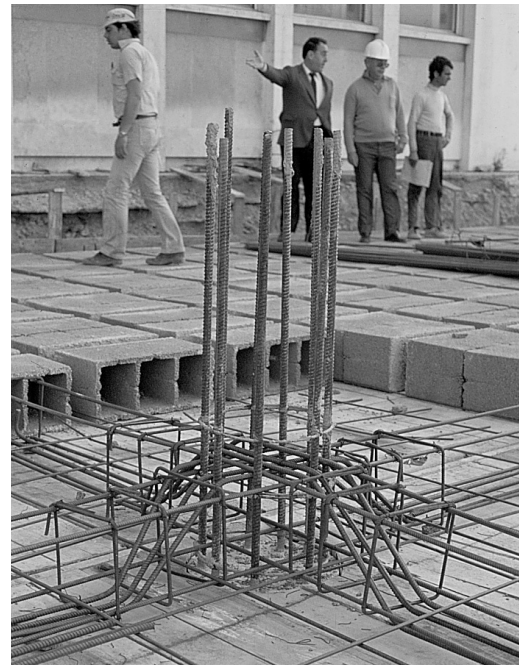


Momento en el que la masa amorfa del hormigón se vierte desde el cubilote sobre el elemento con sus armaduras.



El hormigón puede ser resistente a tracción mediante la introducción en su interior de barras de acero en los lugares en que la pieza está sometida a alargamiento. Los croquis de la figura muestran las posiciones de las armaduras en las vigas: apoyada, empotrada, en ménsula y continua. De una manera intuitiva sabemos cómo serán las deformaciones y, por tanto, por dónde se producirá la rotura causada por las tracciones. A partir de aquí, el armado de la pieza es evidente.

Si en los elementos que trabajan a compresión colocamos unas armaduras de acero, podemos hacerlos más esbeltos, ya que parte



Detalle de la armadura de un nudo en el que confluyen elementos horizontales y un pilar.

de las cargas serán asumidas por el acero y, además, el efecto de zunchado de los estribos da más capacidad al hormigón. Es el caso de los pilares y del armado de jácenas en las zonas de compresión.

La resistencia a compresión es muy variable pero puede llegar a 500 kg/cm^2 ; los valores usuales están alrededor de los 200 kg/cm^2 . Su resistencia a tracción, sin el acero, es de una décima parte.

El hormigón armado tiene una serie de ventajas que lo han convertido en el gran protagonista de nuestras construcciones actuales. Las materias primas son inagotables, su coste es bajo, su puesta en obra es relativamente simple, es bastante resistente al fuego y es formácea, es decir, capaz de adoptar la forma del molde en el que se vierte (I-14).

Ahora bien, la técnica del hormigón armado ha sido posible porque se han dado tres condiciones favorables simultáneas; si hubiera fallado alguna, habría sido inviable:

- adherencia; si las barras de acero actúan como un cosido de las fisuras provocadas por las tracciones, ha de quedar garantizado que no podrán resbalar dentro de la masa del hormigón endurecido. Esto se consigue mediante la rugosidad de la superficie de los redondos de acero y por anclajes a sus extremos.

- dilatación térmica; si los coeficientes de dilatación térmica del acero y del hormigón fuesen muy diferentes (I-11), los cambios de temperatura producirían dilataciones diferentes y, por consiguiente, unas tensiones superficiales tan fuertes que fácilmente superarían las de adherencia. Afortunadamente, los coeficientes de los dos materiales son muy similares.

- corrosión; el acero es un material fácilmente oxidable al aire libre, pero embebido en la masa de hormigón y con recubrimientos del orden de 4 cm queda suficientemente protegido si el ambiente que lo rodea no es agresivo. La oxidación por falta de recubrimiento o baja alcalinidad produce un aumento del volumen del acero y, por tanto, una rotura del hormigón, con la consiguiente merma de su capacidad portante (I-11).

Las formas “naturales” evolucionadas

La utilización de los nuevos materiales, acero y hormigón armado, en la resolución de los elementos en los que aparecen tracciones, vigas o armaduras, introduce grandes novedades en la manera de construir tradicional, aumentando la luz máxima a salvar con una mínima cantidad de canto, material y peso. Es el caso de las vigas metálicas que sustituyen a las de madera a partir de finales del siglo XIX, y las de hormigón armado unas décadas después. Pero es en

las armaduras trianguladas donde más rendimiento podemos extraer de las extraordinarias propiedades del acero.

La mayor limitación de las armaduras de madera es la debilidad de las uniones entre las barras. Y esto es lo que se consigue superar definitivamente si utilizamos acero. Una gran cantidad de puentes de ferrocarril construidos en el siglo XIX se basan en esta propiedad, que también podemos utilizar en edificios para resolver problemas de gran luz, como se comprueba en los edificios deportivos.



Si la triangulación se realiza en tres dimensiones, se obtiene una malla espacial que cubre el espacio en dos direcciones simultáneamente.

Los nuevos procedimientos de la madera laminada permiten, a pesar de todo, seguir utilizándola en grandes luces.



Puente de gran luz resuelto mediante dos vigas trianguladas de gran canto de madera laminada.

Los muros también disponen de nuevas posibilidades arquitectónicas y estructurales cuando el material utilizado es el hormigón armado.

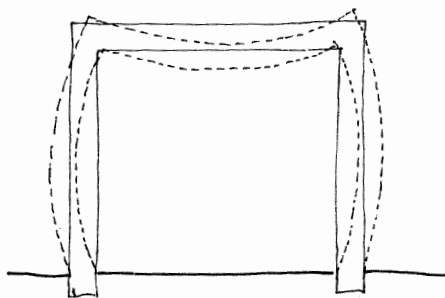
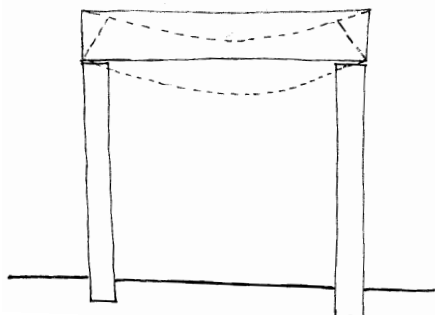


Muros de fachada portantes resueltos en hormigón armado.

El pórtico

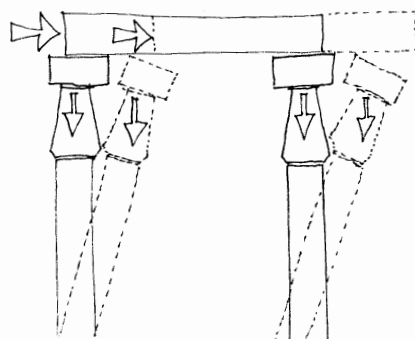
Volvamos a la figura formada por tres piezas, dos pies derechos y una jácena apoyada en ellos. Ésta está sometida a flexión y los dos pies derechos a compresión. El pie derecho recibirá la carga que le pueda transmitir la pieza horizontal, y para no deformarse por pandeo requerirá una determinada sección; la jácena necesitará un canto determinado para que su deformación no rompa, por ejemplo, los tabiques que podamos construir encima.

Supongamos que nos interesa reducir el canto de la viga. Una solución es que en la de-



formación también participen los pies derechos, repartiendo entre todos la dificultad de salvar la luz. Pues bien, esto se puede conseguir realizando nudos rígidos, denominados así porque no permiten el giro relativo de las dos barras que concurren en ellos. En este caso, la deformada es la de la figura, y podremos comprobar que la flecha puede ser la misma que la anterior utilizando bastante menos acero u hormigón armado. Habremos conseguido un pórtico de nudos rígidos.

La ventaja del pórtico respecto a las tres piezas no empotradas entre sí es que necesita menos material, ya que se aprovecha al máximo para resolver el problema fundamental, que es la flexión producida por el elemento horizontal debido a la luz a salvar. Pero, además, constituye un conjunto estable frente a los empujes horizontales, propiedad que no tiene el trilito con el arquivrabe simplemente apoyado.



Los pórticos de acero, y especialmente los de hormigón armado, han permitido el desarrollo extraordinario de la construcción de todo tipo de edificios en los que la característica fundamental, como ya se ha indicado anteriormente, es la especialización de los elementos de



Estructura de pórticos de hormigón armado en espera de la realización de los cerramientos de fachada.

soporte verticales, concentrados en pilares, que dan una flexibilidad de la que carecen los edificios realizados con muros.

ECONOMÍA Y CERTEZA PREVIA DE LA ESTABILIDAD

A lo largo de la historia siempre ha existido la necesidad ineludible de averiguar, previamente a su construcción, cuáles son las formas más económicas que puedan asegurar la ausencia de fallos en la estabilidad de los elementos o de los edificios. En épocas anteriores al siglo XIX, en general, la única manera de tener esta certeza era el conocimiento acumulado por la experiencia a lo largo de siglos, que se concretaba en reglas de proporcionalidad entre las dimensiones del espacio y las de los elemen-

tos. Se sabía que un edificio era estable porque también lo habían sido otros muy parecidos, de manera que sólo se tenía que imitar al anterior, pero sin exceder en demasía su tamaño o variar su forma. La incertidumbre se presentaba cuando el edificio tenía el tamaño o las formas o los materiales muy diferentes a los anteriores. En este caso, la única solución posible era hacer una experimentación real, con todos los riesgos que esto comportaba.

Desde mediados del siglo XIX se han desarrollado métodos de cálculo basados en la ciencia matemática que ayudan a conocer previamente el comportamiento mecánico de las innovaciones con sus dimensiones más ajustadas sin necesidad de experimentarlas. El paso del tiempo no ha hecho más que perfeccionar portentosamente esos métodos de cálculo.

En general, el cálculo preciso de las dimensiones de una estructura, de alguno de sus elementos, o de cualquier elemento constructivo sometido a acciones que lo pueden deformar o romper, sigue los pasos siguientes:

a) establecimiento de un modelo representativo, simplificado a efectos de cálculo, en el que quedan fijadas la configuración general de la estructura o elemento, las características de sus materiales, las condiciones de los puntos de soporte, los enlaces entre elementos, simplemente apoyados, empotrados, etc.;

b) determinación de todas las combinaciones de las acciones o cargas que ha de soportar la estructura o los elementos;

c) cálculo de esfuerzos, es decir, las fuerzas que actúen en cada una de las secciones de los elementos para las combinaciones de acciones más desfavorables;

d) cálculo de las dimensiones de las secciones, comprobando si la sección es suficientemente grande para que las tensiones resultantes en todos los casos sean inferiores, según un coeficiente de seguridad establecido por la normativa, a las resistencias de los materiales o fábricas;

e) cálculo de las deformaciones de los elementos cargados, que deberán ser inferiores a las que puedan interferir en su uso o afectar a su integridad.

Estos procesos quedan regulados por las normativas específicas de cada material o tipo estructural. El Código Técnico, en su parte de-

dicada a la seguridad estructural, contiene el documento SE-F para paredes de ladrillo o bloques, el SE-A para las estructuras porticadas de acero, el SE-M para las de madera y el SE-C para cimentaciones. Las estructuras de hormigón armado se rigen por la instrucción EHE. La norma de construcción sismorresistente NCSE-02, además de indicar las acciones sísmicas previsibles, también establece condiciones de diseño particulares para todas las estructuras anteriores, en el caso de que el riesgo sísmico sea elevado (I-10).

La complejidad de estos métodos de cálculo ha llevado a que desde hace cien años se estudien separadamente de las asignaturas de construcción, en las denominadas de cálculo estructural o sencillamente de estructuras. El lector interesado en profundizar en estas cuestiones deberá acudir a otros textos más especializados.

Suponiendo que ya hemos conseguido un espacio estable, nos ha de preocupar crear el ambiente adecuado a las actividades que ha de acoger. Veámoslo.

CAPÍTULO II. Adecuación del ambiente

El principio de adecuación del ambiente

El término ambiente es uno de los más polisémicos de los utilizados en este texto. Sus significados pueden estar situados en la esfera de lo estrictamente cuantificable o en la de lo subjetivo e inaprensible, y pueden abarcar desde la escala del globo terrestre hasta la de un íntimo rincón donde amar.

En un sentido amplio, puede entenderse como el conjunto de variables de todo tipo que pueden producir sensaciones en las personas, y que dependen del medio en que discurre su vida. Son variables que incluyen el comportamiento de otras personas, que actúan a su vez como creadoras y modificadoras del ambiente. Variables que dependen también del efecto de los materiales, superficies que envuelven los espacios, y también de los muebles y objetos. Y, por último, las variables físicas, químicas y biológicas que caracterizan el principal soporte del ambiente que no es sino el propio aire.

La influencia que puede tener la parte material del edificio en el ambiente es, obviamente, muy intensa en todos los ámbitos citados. Desde la esfera psicológica, en la que se puede incluir desde la sensación de seguridad básica hasta la percepción artística, pasando por ámbitos cuantificables de los que depende la sensación de comodidad o confort. Este último es el objetivo del conjunto de temas que se desarrollan a continuación.

En definitiva, el significado concreto del término ambiente utilizado en este texto es el conjunto de factores físicos (humedad, temperatura, presión, luz, etc.), químicos (composición química del medio), y biológicos (interacciones entre los organismos) a los que está sometido cualquier usuario de un edificio y que,

captados por sus sentidos, determinan un estado que puede valorarse como cómodo o incómodo.

Como ya se ha mencionado, el sentido fundacional de la arquitectura reside en dotar a los espacios de unas condiciones ambientales que los hagan más favorables para el desarrollo de nuestras actividades modificando las variables anteriormente citadas. Es decir, la arquitectura modifica las condiciones naturales del ambiente. Pero no sin nada a cambio. Esa modificación no deja de producir unas nuevas condiciones, inexistentes en la naturaleza, que pueden llegar a ser negativas.

Consideradas así, podemos definir dos grandes grupos de variables ambientales: las que encontramos en la naturaleza y las que son consecuencia de la existencia de los propios edificios y, en definitiva, de nuestra cultura o civilización. A las primeras las llamaremos naturales y a las segundas artificiales.

Además de representativa de una realidad, esta clasificación se justifica por ser una herramienta conceptual de enorme valor, ya que define la esencia de la acción arquitectónica con gran eficacia operativa. Esto se comprueba cuando los que han de concebir un edificio se enfrentan a situaciones bien diferentes de las que están acostumbrados, como es el caso, por ejemplo, de un “arquitecto sin fronteras” que afronta un medio como una selva tropical. Sin duda, las primeras variables a conocer son las naturales. Y sólo una vez conocidas éstas deberá entrar en las artificiales.

El primer grupo de variables, las naturales, viene condicionado fundamentalmente por el clima del lugar y, en menor medida, por el tipo de terreno. Consecuencia del clima es el régi-

men de lluvias, las variaciones térmicas a lo largo del día, la noche y las de las estaciones, y la intensidad y variación de todos los factores que definen la luz natural.

Si buscamos definir su causa básica, podemos adoptar dos parámetros: el sol y el agua, es decir, la situación de nuestro lugar para edificar con relación a la trayectoria que describe el sol sobre la bóveda celeste según la latitud, y la proximidad o lejanía de masas de agua incluyendo la altitud sobre el nivel del mar.

El agua nos determina la lluvia, el sol nos determina la luz, y el agua y el sol conjuntamente todas las variables térmicas. La forma y los materiales de las envolventes de los edificios son, en una buena proporción, consecuencia de la búsqueda por el ser humano de los medios para modificar a voluntad la influencia de estos dos condicionantes esenciales, el agua y el sol.

Pero el propio edificio, gracias a las nuevas condiciones ambientales más favorables a la vida, puede llegar a ser un nuevo nicho ecológico para otros seres vivos, desde los micro hasta los macroscópicos, que pueden aumentar sus capacidades agresivas contra el hombre. Y por otro lado, la utilización de nuevos materiales o aparatos del equipo pueden producir radiaciones, gases etc., muchas veces nocivos. En definitiva, contaminación. A lo que hay que añadir nuestra propia convivencia como generadora de nuevas molestias inexistentes en un estado natural. En la naturaleza nunca existió nada tan molesto como el ruido producido por todas las máquinas inventadas por el hombre, especialmente las que permiten sus desplazamientos, ni el ruido que producen los que conviven en nuestra proximidad. Es el ambiente artificial negativo.

Se puede añadir, a la vista de lo anterior, que la gran diferencia entre las variables naturales y las artificiales reside en que éstas se pueden corregir en sus causas originales, mientras que aquéllas sólo en sus efectos. Es probable, o cuando menos posible, que dentro de pocos años los ruidos hayan desaparecido como consecuencia de nuevas técnicas en la automoción o por el cambio de costumbres. Por contra, el sol seguirá saliendo por el Este.

En definitiva, el objetivo de conseguir un ambiente adecuado al desarrollo de las actividades en el interior de los edificios, se traduce en cinco requisitos concretos, tres en relación al ambiente natural, la exclusión del agua, el control de las variables térmicas y lumínicas, y dos que buscan controlar las variables del nuevo ambiente artificial, la contaminación y el ruido.

El esquema de cada uno de los cinco temas que los desarrollan es similar. A partir de la definición de las variables que concretan el requisito, se establecen las exigencias que han de cumplir los elementos o subsistemas constructivos. Hecho lo cual, se comprueba brevemente cómo las diferentes soluciones constructivas concretas, según sean sus formas y materiales, son capaces de aportar las prestaciones que las satisfacen, remitiendo al lector a los temas donde se tratan más ampliamente, en los tomos II y III.

El CTE reúne todo este conjunto de condiciones bajo la denominación de requisitos relativos a la habitabilidad que, recordémoslo, son: 1) higiene, salud y medio ambiente, 2) protección del ruido, y 3) ahorro de energía y aislamiento térmico. El primer requisito reúne la estanquidad al agua, la pureza del aire y la evacuación de residuos. En este libro se aborda en I-3 por separado la estanquidad al agua por su extraordinaria importancia como factor arquitectónico en cualquier época y lugar. El resto de los requisitos de higiene se sitúan en I-6. La protección del ruido se desarrolla en I-7 con un planteamiento básico igual al del Código. El ahorro de energía y el aislamiento térmico se desarrolla en I-4 y I-5, aunque este último, dedicado a la iluminación, va más allá de lo prescrito por el código.

TEMA 3. Agua

LA AUSENCIA DE HUMEDAD COMO REQUISITO BÁSICO

MODOS DE DESPLAZAMIENTO DEL AGUA EXTERIOR

Desplazamiento por escorrentía

Escorrentía simple

Escorrentía invertida por el viento

Escorrentía a nivel

Desplazamiento por capilaridad

Capilaridad

Porosidad

INTERRUPCIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DEL AGUA EXTERIOR HACIA EL INTERIOR

Métodos para superficies

Impermeabilidad

Espesor

Espesor más cámara de aire

Métodos para juntas

Juntas cerradas

Solapes

Juntas abiertas con drenaje

COMPORTAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DE LA ENVOLVENTE

Elementos expuestos directamente a la lluvia

Cubiertas

Fachadas

Variabilidad del grado de exposición

Elementos en contacto con el terreno

Muros y cimientos

Soleras y forjados

CONDENSACIÓN DEL VAPOR DE AGUA DEL AIRE INTERIOR

Condensaciones superficiales

Condensaciones intersticiales

LA AUSENCIA DE HUMEDAD COMO REQUISITO BÁSICO

Al contrario de lo que ocurre en el resto de los temas sobre el ambiente, el requisito que se trata en éste es bien sencillo de formular: el interior del edificio debe permanecer absolutamente seco siempre. La razón es bien conocida. El ambiente producido por unos elementos constructivos húmedos en sus paramentos in-

teriores, además de insano, es incompatible con una comodidad mínima.

Pero también la humedad es un acelerante de procesos destructivos de los materiales, y por ello la protección contra el agua vuelve a estar muy presente en I-11, dedicado a cómo se han de construir los edificios para que duren el máximo tiempo posible.

En el presente tema se plantean los procedimientos básicos para evitar que el agua exte-

rior penetre en el interior o la que ya está dentro se condense y afecte a los ocupantes del edificio. Obviamente, estos mismos procedimientos también son necesarios para proteger al edificio.

El agua se puede presentar en los edificios proveniente del exterior o bien desde el mismo interior. En el primer caso es agua de lluvia o de nieve, del rocío matinal, de condensación de la niebla, o bien de la humedad del terreno. En el segundo caso, el origen más frecuente es la humedad de condensación que se produce en invierno cuando el vapor de agua disuelto en el aire del interior del edificio se condensa en las superficies frías que están en contacto con el exterior. También se han de considerar las posibles fugas de las instalaciones de agua o las de saneamiento, que lógicamente sólo se pueden evitar realizando correctamente la instalación y su mantenimiento. En caso de que la construcción sea de obra de fábrica, además se ha de considerar la humedad contenida en los morteros, los hormigones, los yesos, etc., pero que al cabo de un año o dos desaparece.

Los modos para evitar la humedad que estudiamos en este tema son tres: dos contra la procedente del exterior: la lluvia y el agua del terreno (regulados por el CTE-HS-1), y uno contra la de la condensación interior del vapor de agua (CTE-HE-1). La mayor parte del tema se dedica a evitar la acción del agua de lluvia, de la que primero se analizan los modos como se mueve y pasa, si no se impide, del exterior al interior.

MODOS DE DESPLAZAMIENTO DEL AGUA EXTERIOR

Son dos, por escorrentía y por capilaridad.

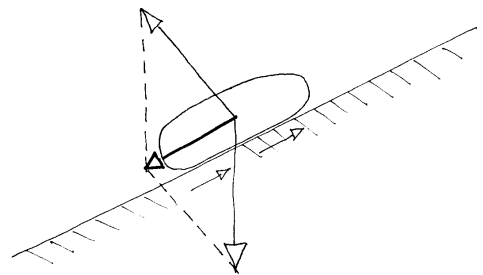
Desplazamiento por escorrentía

Escorrentía simple

La escorrentía es un mecanismo de desplazamiento conocido por todos, ya que es el que produce el movimiento del agua en los ríos y en las calles y tejados cuando llueve. Es el resultado de la acción de dos fuerzas no equilibradas:



Un caso de escorrentía controlada con fines monumentales.



la de la gravedad sobre la masa líquida y la reacción de la superficie inclinada por la que discurre. La resultante da el sentido y dirección del movimiento, el cual, no obstante, está dificultado por la fricción del agua contra las superficies con las que entra en contacto.

La escorrentía se produce sobre cualquier material sobre el que cae agua de lluvia y que presente una superficie inclinada. Si el material es impermeable, se producirá una escorrentía casi absoluta. Por contra, si el material es poroso, se pondrá en marcha el segundo sistema de desplazamiento del agua, la capilaridad, que ocasiona que parte del agua no se escurra y acabe empapando el material.

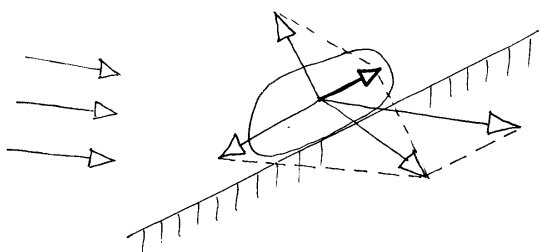
Para evitar las entradas de agua hacia el interior del edificio por escorrentía será necesario tener en cuenta que el agua se desplaza siempre por el camino más fácil, y, en consecuencia, debemos hacer dos cosas a la vez:

- crear obstáculos más o menos impermeables a la penetración dentro de la parte habitada, y,
- ofrecer al agua un recorrido lo más fácil y alejado posible hacia el exterior, directamente o por medio de conductos cerrados de desagüe.

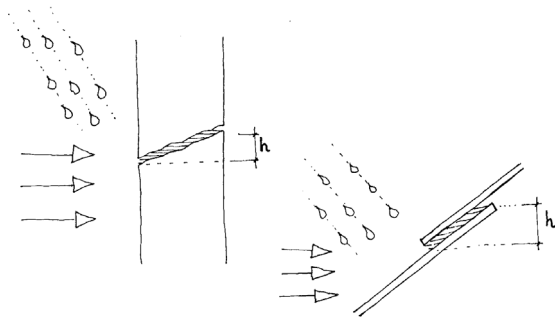
No se ha de olvidar en ningún momento que el agua nunca sube por sí sola, aunque sí puede hacerlo por la acción del viento.

Escorrentía invertida por el viento

El viento ejerce sobre el agua que se escurre por un plano inclinado una fuerza más o menos horizontal, que si es suficientemente potente puede contrarrestar la gravedad y producirse uno de los pocos casos en que el agua "sube".



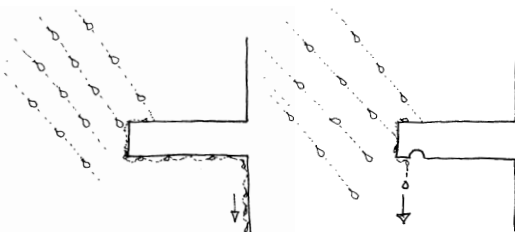
Pero no sólo puede ocurrir en las superficies abiertas. En las posibles discontinuidades de los elementos exteriores (una fisura de un muro, el espacio que dejan entre sí dos tejas, la junta entre dos paneles o entre los perfiles de una ventana), la presión del viento puede provocar el ascenso de una lámina de agua en una



altura proporcional a la velocidad del viento. Por ejemplo, una velocidad de 7 m/s puede levantar una lámina de 8 mm, y si es de 8 m/s, puede levantar una de hasta 9 mm. Si la fisura, el solape entre dos tejas o la ranura entre los paneles, tiene una proyección en vertical mayor que los valores en milímetros citados, el agua no entrará.

Escorrentía a nivel

Pero el viento no es la única causa que puede producir escorrentías anómalas. El agua, debido a las fuerzas de tensión superficial que se mencionan en el apartado siguiente, puede



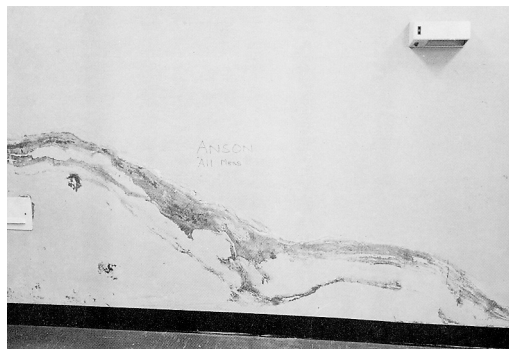
hacer recorridos horizontales desafiando la ley de la gravedad. Es el efecto que se produce en los sofitos o planos inferiores de elementos en voladizo como balcones o marquesinas.

La solución para evitar este tipo de desplazamiento, que en ocasiones puede llevar el agua al interior, es situar un obstáculo realmente insalvable, el goterón.

Desplazamiento por capilaridad

Capilaridad

La capilaridad se define como la capacidad que tiene un líquido, en este caso el agua, de ascender por un tubo de diámetro similar al de un cabello (de ahí el término) en contra de la gravedad como consecuencia de fuerzas de adhesión y cohesión, con un valor de ascenso que depende de la tensión superficial.



Efectos de la ascensión de humedad por capilaridad en una pared en contacto con el terreno.

También es un fenómeno conocido por todos. Es la razón por la que un terrón de azúcar se empapa totalmente aún cuando sólo se moje su parte inferior.

Lógicamente, si la capilaridad tiene suficiente potencia para mover el agua en sentido vertical contrarrestando su peso, también puede desplazarla en cualquier otra dirección vertical u horizontal. Lo único que necesita son oquedades con tamaños capilares. La mayoría de los materiales de los edificios presentan este tipo de oquedades, que se denominan poros, y en consecuencia son susceptibles de facilitar el movimiento del agua por su interior, incluso en contra de la gravedad. En consecuencia, la porosidad es una propiedad de gran trascendencia en el comportamiento de los materiales frente al agua.

Porosidad

Un material es poroso cuando contiene muchos huecos llenos de aire en su interior, y su porosidad queda definida como la proporción de volumen de los huecos en el volumen total del material.

Es importante distinguir entre porosidad abierta o cerrada. Si un material tiene los poros cerrados al exterior no se produce entrada de agua y su comportamiento es equivalente al de un material impermeable. En caso de que los poros estén conectados entre sí y con el exterior, todo este volumen interior se puede llenar completamente de agua por capilaridad. Pero también es decisivo el tamaño de los poros.

La porosidad de un material depende del proceso mediante el cual se han producido en la naturaleza, o bien los ha fabricado el hombre. En general, los materiales no porosos son consecuencia de una solidificación por enfriamiento de sustancias en estado líquido, mientras que los porosos provienen de procesos de desecación en los que ha intervenido el agua. Ejemplos de no porosos son las rocas eruptivas, el vidrio y el acero, y de porosos, las rocas sedimentarias, el hormigón, los ladrillos o la madera.

El concepto de permeabilidad de un material es consecuencia del tipo de porosidad. Un material rigurosamente no poroso como el

vidrio es totalmente impermeable. Si el material es poroso, que sea más o menos permeable dependerá de su porosidad y de su tipo, es decir, de la cantidad porcentual de poros dentro del volumen total y de su intercomunicación.

Si el material tiene la porosidad abierta, el agua circula por su interior por el efecto de su propio peso, pero también en sentido vertical y en cualquier dirección bajo el efecto de la capilaridad si los poros y los canales son suficientemente finos.

Es el caso de partes bajas de las fachadas de obra de fábrica no impermeabilizadas en su base. El agua sube por los poros hasta que se produce un equilibrio entre su peso, las fuerzas capilares y la evaporación. En este caso, la altura alcanzada por el agua puede variar, pues, con la naturaleza de la porosidad y con el ambiente térmico general. Lógicamente, la solución pasa por colocar materiales impermeables en la base de las fachadas que están en contacto con el terreno.

El efecto de la lluvia que alcanza a las partes superiores de las fachadas de obra de fábrica es algo diferente. Parte del agua se escurre por la superficie y parte penetra por capilaridad. Si llueve torrencialmente durante mucho tiempo, por capilaridad atravesará todo el grueso y alcanzará el interior, y cuando deje de llover la evaporación secará el muro.

Veamos cuáles son las soluciones utilizadas en la actualidad para evitar la entrada del agua.

INTERRUPCIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DEL AGUA EXTERIOR HACIA EL INTERIOR

Generalmente, los elementos de la envolvente en contacto con el exterior están formados por piezas manufacturadas, ladrillos, tejas, placas, paneles, que tienen dimensiones menores que las de las fachadas o cubiertas, que se agrupan entre sí para formar el elemento de mayor tamaño dejando entre ellas un gran número de juntas. Según el tamaño de las piezas, su número será mayor o menor. Sólo en las fachadas de obra de fábrica es posible conseguir, mediante revestimientos continuos realizados in situ, superficies tan grandes como la misma fachada sin apenas juntas, pero que no pueden

evitar la aparición de juntas en algún lugar, como por ejemplo su entrega con las carpinterías de las ventanas.

En definitiva, en los elementos de la envolvente siempre tendremos superficies continuas más o menos grandes según los casos, que tarde o temprano acaban en una junta de un tipo u otro. Las estrategias que se aplican para conseguir que se detenga el desplazamiento del agua hacia el interior a través de las superficies continuas y a través de las juntas son muy diferentes. Veamos las primeras.

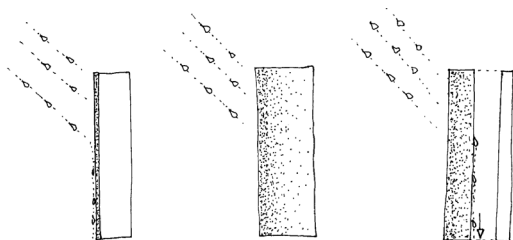
Métodos para superficies

A la vista de lo explicado en el apartado anterior, podemos decir que básicamente son dos:

- la impermeabilidad, basada en la utilización de materiales impermeables y,
- en el caso de los materiales permeables, el espesor.

Sin embargo, existe un tercer método que resuelve el exceso de espesor:

- la discontinuidad producida por una cámara de aire.



Impermeabilidad

Teóricamente, las superficies impermeables (o de muy baja porosidad) son el mejor procedimiento para evitar la entrada de agua al interior del edificio. Ejemplos de ello son los edificios de vidrio y acero. De hecho, cierta arquitectura basada en la exhibición de los avances tecnológicos utiliza casi exclusivamente este sistema. Sobre ellas sólo se produce la escorrentía que, bien encauzada, aleja el agua hasta su evacuación total.

Ahora bien, estos materiales impermeables, sean vidrios, metales o telas, siempre tienen

dimensiones menores que la cubierta o la fachada, lo que comporta la aparición de juntas que también deberán interrumpir la entrada de agua. La solución de estas juntas entre paneles impermeables se resuelve con alguno de los procedimientos que se exponen más adelante.

Pero en la mayoría de las ocasiones se utilizan materiales no estrictamente impermeables, como el ladrillo, la teja o el mortero. La interrupción al paso del agua se consigue, en primera instancia, con el espesor.

Espesor

Es el procedimiento que convierte a los materiales porosos en prácticamente impermeables, y en el que basa la estanquidad la construcción tradicional.

Ahora bien, como la lluvia directa y persistente puede llegar a atravesar por capilaridad los mayores gruesos, el procedimiento sólo funciona si además se dan al menos una de las dos condiciones favorables siguientes:

- los paramentos afectados están protegidos de la llegada directa del agua, por ejemplo, por un alero, y
- el régimen de humedad o lluvias es intermitente y permite la evaporación del agua antes de su llegada al interior.

Con mayor motivo que en el caso de los materiales impermeables, el reducido tamaño de las piezas ocasiona infinidad de juntas que habitualmente se resuelven con el sellado con materiales también porosos o con el solapamiento de las piezas.

En el caso en que el espesor por sí mismo no sea suficiente, porque no se cumplan ninguna de estas condiciones, u otras causas de otro tipo como el exceso de peso que ocasiona, es necesario recurrir al método del corte de aire mediante cámaras que interrumpan la capilaridad.

Espesor más cámara de aire

Se basa en introducir en el posible recorrido del agua un hueco de aire de dimensiones suficientes para que impida el desplazamiento

hacia el interior, tanto por escorrentía como por capilaridad. Son ejemplos de ello la cámara de aire de las fachadas de obra de fábrica o el drenaje que se utiliza debajo de los pavimentos de las plantas bajas en contacto con el terreno.

El goterón citado anteriormente puede considerarse como un caso de corte del recorrido por medio de aire interpuesto.

Métodos para juntas

Los tipos de juntas entre elementos constructivos en contacto con el exterior se pueden agrupar según la siguiente clasificación:

- entre elementos iguales, pequeños, como ladrillos, tejas, etc., grandes piezas, paneles hormigón, etc., partes del edificio,
- entre piezas de diferentes formas y materiales, fijas, como la del marco de una ventana con la obra, las del vidrio con los perfiles del batiente, etc., móviles entre piezas complementarias, como entre el batiente y el marco.



Diversos tipos de juntas entre paneles prefabricados y con las carpinterías de las ventanas.

En todos los casos, la solución dada a una junta en contacto con el agua exterior ha de cumplir:

- impedir la entrada de agua al interior,

• en la mayoría de los casos, ser estanca al aire,

• y todo ello a pesar de los movimientos cíclicos de abertura y cierre de la junta debidos a los cambios climáticos u otras causas (I-11).

Los métodos varían según sean estos movimientos. Si son muy pequeños, se puede utilizar el sellado con un material rígido como el mortero. Si la amplitud del movimiento es grande, requiere un material de sellado flexible o bien dejar la junta abierta y solapar las piezas. En el caso de las carpinterías exteriores, además de los pequeños movimientos anteriores se han de prever los propios de las piezas móviles.

Los métodos a emplear en cada caso son alguno de los siguientes o alguna de sus combinaciones.

Juntas cerradas

Es el método más simple. Consiste en sellar o hacer impermeable la junta colocando un material que se adapte a sus bordes y que, de una manera inmediata o después de un lapso corto, una vez fraguado o secado, sea impermeable. Hay dos maneras de realizarlas, según sea el material de sellado en el momento de colocarlo: amorfo o con forma.

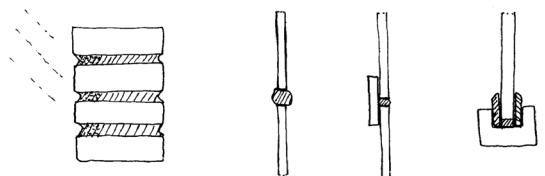
En el primer caso, pueden ser:

- morteros,
- mástiques de sellado de diversos materiales como silicona,
- materiales que se plastifican con el calor y una vez fríos sueldan los bordes,

• colas o pegamentos.

En el segundo, pueden ser:

- perfiles conformados, que habitualmente son de caucho o materiales similares.
- protecciones sencillas como tapajuntas.



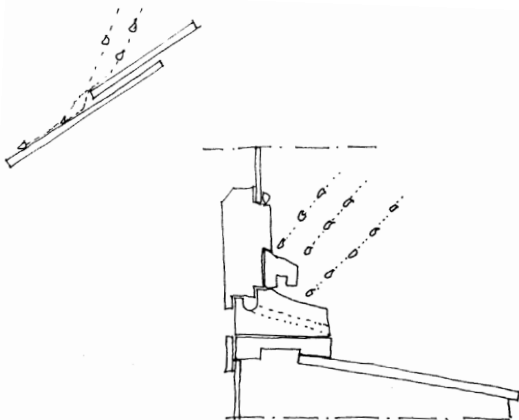
La utilización de unos u otros depende de las piezas a unir y de los movimientos relativos entre ellas. En el tomo III se especifican para cada caso los métodos utilizados. A modo de ejemplo, se exponen ahora algunos de ellos:

- entre piezas pequeñas; el sellado puede ser rígido, como el mortero entre ladrillos, y su eficacia depende de la ausencia total de fisuras, tal como se explica en III-7.2;
- entre grandes piezas con movimientos diferenciales entre sí importantes; pueden ser juntas preformadas o realizadas en obra;
- entre telas impermeables en cubiertas, mediante soldadura o encolado (III-9.2).

Solape

El solape no basa su efectividad en impedir el paso del agua directamente, sino en alejar el recorrido del agua por escorrentía de la junta propiamente dicha, que puede, si es conveniente, quedar abierta. Sólo es aplicable si las piezas están inclinadas con la pendiente necesaria para que se produzca la escorrentía sobre ellas. Las juntas abiertas quedan protegidas por el solape de la pieza superior, que debe tener la suficiente longitud para evitar que el viento pueda invertir la dirección de la escorrentía.

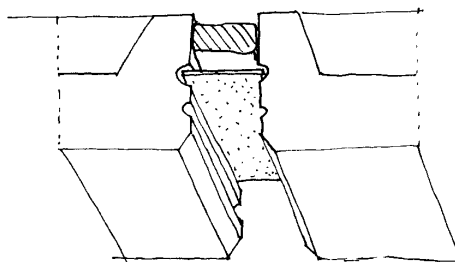
Es el principio en que se basan los tejados de todos los tipos, ya que, además, al no existir continuidad entre las piezas, permite libremente las contracciones y dilataciones térmicas, tal como se expone en I-11.



También es el principio que, combinado con las cámaras de aire y las juntas cerradas y abiertas, hace estancos elementos móviles como las carpinterías de las ventanas.

Juntas abiertas con drenaje

Es el método menos empleado. Su efectividad se debe a que dejan entrar el agua hasta una cámara, en la que pierde la presión ejercida por el viento y cae hasta unos conductos inferiores que la devuelven al exterior. Son ejemplos de



ello las juntas entre los perfiles de las carpinterías de las ventanas o entre paneles metálicos de diseño sofisticado. Casi siempre requieren algún sellado complementario de seguridad o para evitar la entrada del aire y algún tipo de solape.

COMPORTAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DE LA ENVOLVENTE

Mediante los métodos anteriores, combinados entre sí, podemos resolver todos los elementos de la envolvente. Veamos primero los expuestos directamente a la lluvia.

Elementos expuestos directamente a la lluvia

La elección o diseño de los elementos de la envolvente expuestos al agua de lluvia están totalmente condicionados por la exigencia de impedir el paso del agua hacia el interior. Sus materiales, las formas de las piezas básicas, sus juntas, y sus formas generales están total-

mente determinados por la aplicación de alguno de los métodos anteriores y sus combinaciones. La expulsión del agua es una de las exigencias ambientales que mayor influencia ha tenido en la forma de los edificios desde el origen de la arquitectura. Y desde esos mismos inicios ha entrado en relación de diálogo más o menos conflictivo con el principio de conveniencia estética. Pero no adelantemos ideas. Ahora se trata de ver cómo se concretan los métodos generales anteriores en cada uno de los elementos de la envolvente. La relación con la estética se estudia en I-16.

Cubiertas

Habitualmente se clasifican en inclinadas y planas. Estos términos no son muy correctos, ya que por lo general todas las cubiertas son planas y tienen una cierta inclinación. Sin embargo, son términos que, por convención, sirven para identificar claramente los tipos de cubiertas. Las inclinadas son las que tienen una pendiente superior al 15 %, y las planas, inferior al 5 %. Como siempre, queda una franja intermedia, con pocos casos en la realidad, que pueden denominarse cubiertas de baja pendiente.

Para que expulsen el agua con eficiencia es imprescindible que adecuen la pendiente al modo básico mediante el que consiguen expulsar el agua. Las planas se basan en la impermeabilidad absoluta de una lámina o tela que permite un pendiente muy reducida, aunque es mejor que no sea inferior al 1 % ya que es de



Fase de la realización de una cubierta plana en la que se coloca la tela impermeable.

difícil realización y puede ocasionar estancamientos de agua.

Por contra, las inclinadas han de combinar entre sí convenientemente todas las variables puestas en juego:

- la pendiente,
- la forma de la pieza básica,
- el procedimiento de fijación,
- su permeabilidad, y,
- la posibilidad de hacer solapes eficaces

ante la escorrentía invertida por el viento.

La teja normal combina una cierta porosidad con un hábil diseño geométrico. Puesta en seco, ha de tener poca pendiente para aguantarse y, lógicamente, se ha de solapar bastante. Si se toma con mortero requiere una pendiente de entre 20 % (con 15 cm de solape) y 50 %, (con 7 cm). Si lo hace con fijaciones metálicas, puede aumentar la pendiente y disminuir aún más los solapes.



La especial forma de las tejas árabes permite cubrir una gran superficie con un solo tipo de pieza.

Por contra, un material mucho más impermeable, como la pizarra, pero con ninguna posibilidad de generar formas geométricas convenientes, requiere un doble solape y una pendiente no inferior al 50 %.



La forma plana de las piezas de pizarra exige un doble solape.

Las láminas metálicas, cinc, cobre o plomo, absolutamente impermeables y con posibilidades de hacer todo tipo de solapes, permiten todo tipo de pendientes, desde el 5 % hasta la vertical.



El doblado de las láminas de cobre permite juntas estancas para cualquier pendiente superior al 5 %.

Su estudio más detallado se encuentra en III-9.1 y III-9.2.

Fachadas

• Partes opacas

Su verticalidad facilita la evacuación de agua, pero sólo en los tramos generales, ya que toda fachada siempre presenta una serie de accidentes, como juntas, aberturas, impostas, cornisas, que requieren un estudio particular.

Las fachadas de obra de fábrica antiguamente se resolvían con unos espesores considerables y con unas formas exteriores que protegían a las partes más débiles, como los frontones encima de las aberturas o, en general, a



Sección del muro exterior del edificio del siglo XIX visto en I-1.

toda la fachada, como las cornisas y las impostas. En la actualidad siempre incluyen una cámara de aire, imprescindible para resolverlas con espesores más económicos (III-7.2).



Sección típica de una fachada actual de ladrillo en fase de realización.

Las fachadas de paneles de materiales totalmente impermeables, como el acero, el aluminio o el vidrio, sólo presentan dificultades en las juntas entre paneles, que habitualmente se resuelven con un sellado de material impermeable, con una junta preformada o con una junta drenada.

• **Aberturas**

Como la superficie fundamental de los cierres transparentes, el panel de vidrio, es totalmente impermeable, los problemas se presentan en las juntas y en los perfiles de las carpinterías. Si los perfiles son impermeables (metálicos o de plástico), el problema se reduce a las juntas. En la figura se puede ver el sistema más tradicional utilizado en las ventanas de madera, basado en los planos inclinados sola-



Carpintería tradicional de madera.

pados, que aleja el agua de los puntos débiles, y, por otro lado, las cámaras que reducen la presión producida por el viento y los canales que llevan el agua infiltrada hacia el exterior (III-7.1.1).

Variabilidad del grado de exposición

La presencia del agua de lluvia no es constante a lo largo del tiempo ni es la misma en los diferentes puntos geográficos o de un mismo edificio. La elección y el diseño de los elementos de la envolvente ha de considerar entre los factores que inciden en el régimen de lluvias, no sólo el de la región en la que se encuentra el edificio, sino el de su emplazamiento concreto, sea en un denso centro urbano o en un lugar abierto muy ventado.

Las cubiertas son los elementos de la envolvente obviamente más expuestos a la lluvia. Es importante conocer en detalle el régimen de lluvias del lugar, que incidirá desde en el dimensionado de las instalaciones de evacuación hasta en el solape entre las tejas. Los conductos de desagüe, canalones o bajantes, se han de dimensionar de manera que no se produzca una acumulación si la alimentación es más grande que la evacuación (III-2.1).

Los modos como la lluvia puede afectar a las fachadas son mucho más variados, ya que para que afecte seriamente una fachada ha de ir combinada con el viento. El grado de exposición de una fachada dependerá de si está o no protegida de los vientos que acompañan las lluvias intensas.

Las fachadas que dan a calles estrechas dentro de una ciudad grande son habitualmente las menos expuestas; por el contrario, en las fachadas elevadas sobre un acantilado que da directamente sobre el mar, la lluvia impulsada por el viento puede batir fuertemente sobre ella y la posibilidad de que entre agua por alguna junta no bien cerrada es muy elevada. En el tomo III se exponen los criterios que permiten decidir el tipo de fachadas más adecuado a los diferentes grados de exposición a la lluvia: en III-7.1 para las carpinterías, en III-7.2 para las partes ciegas y en III-8 para el conjunto que forman ambas partes de la fachada.

La forma más inteligente de un edificio es aquella que aprovecha al máximo los recursos de sus formas y sus materiales. Así, por ejemplo, el vuelo de la cubierta puede proteger del agua a una fachada de fábrica no totalmente impermeable, o la colocación en el haz interior de la carpintería evita o reduce sus posibles fallos. Los elementos de la envolvente no están

aislados unos de otros, y es preciso analizar las relaciones que se dan entre ellos para sacarles el máximo rendimiento. En III-8 se realiza este análisis, añadiendo además el resto de requisitos, la comodidad térmica, la acústica, etc.

Elementos en contacto con el terreno

La humedad contenida en el terreno puede proceder del agua de la lluvia, de la nieve, de fugas en las instalaciones interiores del edificio y en los sistemas de desagüe.

El único método de desplazamiento posible hacia el interior es la capilaridad a través de los materiales porosos que están en contacto con el terreno.

Muros y cimientos

Los procedimientos a utilizar son: barreras impermeables en los coronamientos de los cimientos y, en el caso de los muros enterrados, el corte por hueco de aire con drenaje lateral.

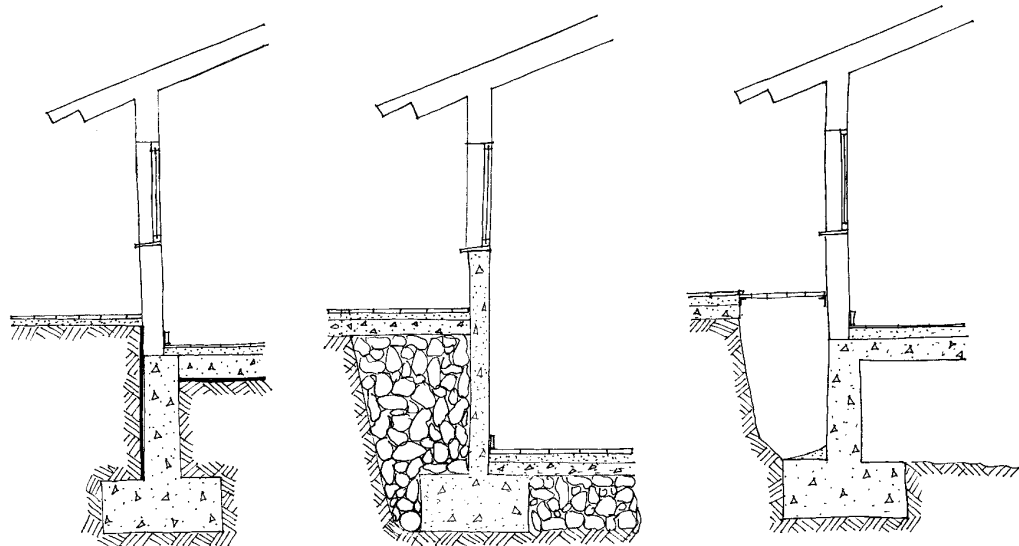
interrumpan la ascensión del agua. El método más eficaz es el denominado forjado sanitario, construido por encima del terreno dejando una cámara de aire ventilada.

Si no es posible este forjado, se ha de construir una solera de hormigón apoyada sobre una disposición de concavidades mucho más grandes que las requeridas para que se produzca la ascensión por capilaridad del agua, mediante los denominados encachados (II-5).

CONDENSACIÓN DEL VAPOR DE AGUA DEL AIRE INTERIOR

Condensaciones superficiales

En la época invernal pueden aparecer en el interior de las fachadas manchas de humedad e incluso agua líquida sin haber llovido una gota en el exterior. La causa es la condensación del vapor de agua existente en el interior, producido bien por la respiración de los usuarios, la cocción de alimentos o las estufas de butano. La condensación se produce sobre las



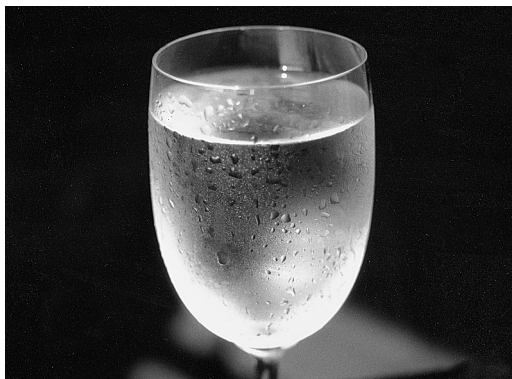
Soleras y forjados

Los suelos de las plantas inferiores del edificio se han de construir sobre unos elementos que

superficies frías que tienen una temperatura inferior, más o menos en dos grados, a la temperatura de rocío, especialmente en las superficies interiores de los vidrios de las ventanas.



En invierno, el frío del exterior baja la temperatura del vidrio por debajo de la de rocío del aire interior.



En verano, el agua fresca baja la temperatura del vidrio de la copa por debajo de la temperatura de rocío del aire.

Forma parte de las imágenes de las épocas frías ver el agua que moja los cristales por dentro de las ventanas.

Es el mismo fenómeno que en verano hace condensar el vapor sobre el vidrio de una copa con agua fría. En definitiva, es un fenómeno bien conocido por todos.

Para que se produzcan condensaciones, además del frío exterior ha de existir bastante vapor de agua en el interior, que es consecuencia directa del grado de ocupación. Cuanto más alto sea éste, más vapor de agua se producirá y más elevado será el riesgo de condensación.

Si la condensación se produce sobre el vidrio no tiene ningún efecto destructivo o negativo. Pero, todo lo contrario, si se produce sobre los elementos constructivos porosos y no resistentes al agua, se pueden producir fenómenos

como la aparición de hongos, que producen olor a moho y que pueden afectar a la salud de los ocupantes.



Efectos de las condensaciones superficiales de una humedad ambiental elevada sobre unas paredes exteriores con poco aislamiento térmico.

Se puede evitar el problema mediante alguna o varias de las siguientes soluciones:

- incrementando el aislamiento térmico de los cerramientos exteriores, que aumentará la temperatura del paramento interior,
- disminuyendo la densidad de vapor de agua, mediante la ventilación o reduciendo la ocupación,
- utilizando un sistema de calefacción por radiación (las estufas de butano producen gran cantidad de vapor de agua).

Condensaciones intersticiales

La obra de fábrica y todos los materiales porosos son permeables también al vapor de agua. Es decir, el vapor interior atravesará la pared

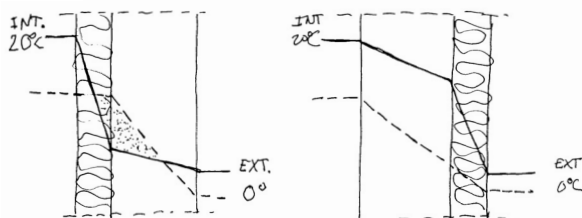
desplazándose hacia el exterior si en el interior de un edificio hay una presión de vapor de agua superior a la exterior, lo cual ocurre casi siempre en invierno. Si la fachada tiene aislamiento térmico, su cara interior no estará fría y no se producirá condensación superficial. Pero puede ocurrir que en el recorrido del vapor hacia el exterior, después de haber traspasado el aislamiento, la temperatura del muro descienda por debajo de la de rocío y se produzca condensación en su interior.

Al no quedar a la vista la condensación, se ignora su existencia y sus efectos nocivos (ataque a los materiales o pérdida de efectividad del aislante) pasan inadvertidos hasta que son irreversibles.

La solución más radical es situar una barrera de vapor en la parte interior, que puede ser de alicatados cerámicos o de pintura de esmalte sobre el tendido de yeso, que impedirá el desplazamiento hacia el exterior del vapor y su condensación. Sin embargo, tampoco es siempre factible colocar la barrera.

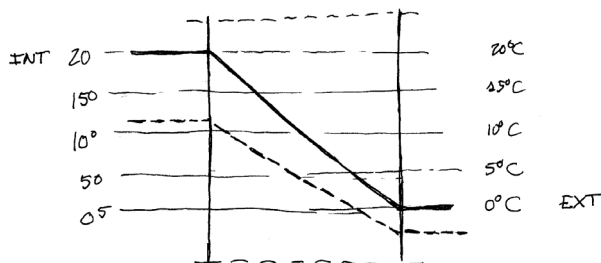
En las cubiertas planas pueden darse situaciones muy similares (III-9.2).

No existen recetas válidas para todos los casos y las soluciones se han de estudiar siempre particularmente. En otros textos más especializados se pueden estudiar con total exactitud, previendo para cada situación geográfica concreta y cada solución constructiva los riesgos de condensación de todo tipo.



Una buena solución, aunque no siempre factible, consiste en situar el aislante en la cara exterior de la fachada de manera que toda la masa de la fábrica tenga siempre una temperatura superior a la de rocío.

Otra buena solución la constituyen los bloques aislantes homogéneos en los que la temperatura es casi siempre superior a la de rocío. Se encuentran más detalles en III-7.2. En las figuras se ha grafiado en línea continua la temperatura de cada punto de la pared, en línea discontinua la temperatura de rocío, y en punteado la zona de posibles condensaciones intersticiales.



TEMA 4. Calor y frío

COMODIDAD TÉRMICA Y CONSUMO ENERGÉTICO

Variables de la comodidad térmica
Modos de desplazamiento del calor
Clima y configuración del edificio

COMODIDAD TÉRMICA EN INVIERNO CON BAJO CONSUMO ENERGÉTICO

Rendimiento máximo de las instalaciones energéticas
Reducción de las pérdidas de la energía utilizada

Aislamiento térmico de la envolvente

Inercia térmica del conjunto

Aprovechamiento de la energía solar gratuita
Materiales de contacto cálidos
Forma y emplazamiento del edificio

COMODIDAD TÉRMICA EN VERANO CON CONSUMO ENERGÉTICO CERO

Disminución de las ganancias energéticas
Protección de los rayos solares
Utilización de los medios naturales de enfriamiento

Aireación

Acumulación

Emplazamientos, formas y materiales

COMODIDAD TÉRMICA COMPLETA CON ENVOLVENTE TOTALMENTE ESTANCA

COMODIDAD TÉRMICA Y CONSUMO ENERGÉTICO

El cuerpo humano se mantiene a una temperatura constante de unos 36 grados centígrados, a pesar de que la temperatura del aire que le rodea sea superior o inferior. Es una capacidad que tienen todos los animales de sangre caliente y que no es más que un aspecto de la capacidad general de todo organismo viviente de mantenerse estable a pesar de vivir en un medio ambiente variable, denominada homeostasis.

Pero es un mecanismo con límites. Desde siempre, el ser humano se ha ayudado de la ropa y de los edificios, desde los más primitivos hasta los más elaborados, con tal de evitar las

situaciones extremas en las que no puede sobrevivir a pesar del mecanismo defensivo de que dispone, o bien con tal de conseguir la máxima comodidad térmica.

Suponiendo que estamos a la sombra, no hace viento, la humedad es normal y estamos en reposo y desnudos, la comodidad se alcanza cuando existe equilibrio entre ambiente y cuerpo, lo cual se consigue cuando la temperatura exterior es de unos 20°C y no de 36°C como parecería lógico de entrada. La razón es que el cuerpo humano es una máquina térmica con excedentes de calor en su funcionamiento que es necesario disipar hacia el exterior, y la diferencia entre 36°C y 20°C es la que permite ceder al ambiente ese excedente.

Si la temperatura es inferior, el cuerpo pierde más calor del que produce y sentimos frío, una señal que obliga a tomar iniciativas conscientes de defensa, como vestarnos, al tiempo que se ponen en marcha mecanismos automáticos como tiritar, encogernos, piel de gallina, etc. Si la temperatura aumenta, el cuerpo no se refrigera convenientemente, se produce la señal de calor y se ponen en marcha mecanismos de contrarresto automáticos, como sudar, o conscientes, como beber agua fresca o abanicarnos para favorecer la evaporación del sudor.

La mayor parte del tiempo necesitamos los mecanismos que nos proporcionan los edificios y la vestimenta para alcanzar la comodidad térmica, y en bien pocas ocasiones estamos cómodos al aire libre y desnudos. En consecuencia, es una clave del construir arquitectónico conocer a fondo cuál es papel que pueden asumir los edificios al respecto.

Para ello es imprescindible conocer previamente dos grupos de cuestiones:

- las variables que determinan efectivamente la comodidad térmica, y
- los procesos por medio de los que se producen nuestros intercambios térmicos con el medio, es decir, conducción, evaporación, emisión y absorción de radiación.

Variables de la comodidad térmica

Para determinar las variables de las que depende este requisito fundamental, nada mejor que acudir a nuestra propia experiencia, la cual apunta ocho variables. Cuatro dependen del clima en que vivimos: radiación, temperatura del aire, humedad y movimiento del aire. Las cuatro están siempre interrelacionadas: puede ocurrir que haya un viento en calma, una temperatura muy baja, pero una radiación muy alta y que estemos cómodos, por ejemplo un día soleado en la nieve; pero si el movimiento de aire es muy fuerte, la sensación producida es la contraria, a pesar de que las otras dos variables sean las mismas, o incluso más favorables. Si la humedad es muy elevada y hace calor por mucho que sudemos no conseguiremos refrescarnos, ya que el sudor no se evaporará y sólo lo lograremos si ponemos el aire en movimiento con un abanico o un ventilador.

Los edificios pueden modificar los valores de estas variables en los espacios interiores mediante instalaciones de calefacción o refrigeración y con los materiales utilizados en la envolvente. Los acabados, suelos, paredes, mobiliario, que están en contacto con la piel también intervienen decisivamente, hasta el punto de que llegan a definir una quinta variable, que podemos denominar temperatura de contacto.

Las otras tres variables quedan ligadas a la iniciativa del usuario: la vestimenta, la actividad física y la ingesta. Con ellas se puede compensar los efectos del clima o controlar lo que no se ha resuelto a través del edificio.

Cuando se proyecta un edificio se ha de intentar controlar las cinco primeras, pero siempre teniendo en cuenta las tres últimas. No es lo mismo proyectar un gimnasio, por ejemplo, donde se ejerce una actividad física alta que una biblioteca, donde los usuarios están en actitud de reposo.

La función de los edificios es, en consecuencia, alcanzar unos valores de las cuatro variables climáticas lo más cercanos posible a los que son considerados óptimos y dar a los acabados con los que se puede entrar en contacto unas calidades térmicas adecuadas. Para la mayoría de las personas, en reposo, estas condiciones se pueden concretar en 20°C de temperatura del aire, algo más de temperatura radiante, 50 %-60 % de humedad, aire en calma y superficies de contacto neutras. En estas condiciones las personas en general se sienten cómodas, ya que además pueden ir vestidas con ropas muy livianas. Obviamente, son valores medios que sólo se exponen aquí como referencia general. El cálculo numérico de una instalación de calefacción debe manejar mayor número de datos. En cualquier caso, el más importante es la temperatura del aire.

En la actualidad, estos valores pueden alcanzarse con facilidad en el interior de los edificios, a pesar de que las condiciones exteriores sean extremas, gracias a las instalaciones de calefacción y de climatización. La energía necesaria es suministrada por el gas, el petróleo, la electricidad, etc., aunque, tal como se plantea más adelante, la nueva situación medioambiental obliga a limitar al máximo su consumo.

Modos de desplazamiento del calor

Los procedimientos mediante los que el calor se desplaza de un lugar a otro son los siguientes:

- radiación, o transporte del calor mediante ondas electromagnéticas a través del espacio vacío o del aire; es el sistema en que está basada nuestra vida, ya que es el procedimiento por el que llega a la Tierra el calor del Sol.

- conducción, o transporte de calor a través de la materia mediante intercambios de energía entre sus átomos; obviamente, no se puede producir en el vacío.

- convección, o transporte de calor propio de la atmósfera terrestre y de los interiores del edificio, ya que es el transporte que producen los movimientos de las masas de aire calientes.

Los dos primeros son los únicos métodos que tenemos nosotros como seres vivos para intercambiar calor con el medio ambiente.

Percibimos claramente radiación en nuestra piel cuando nos colocamos delante de un objeto caliente, como un radiador de calefacción, las llamas del hogar de una chimenea, o cuando tomamos el sol en un día soleado. En realidad todos los objetos emiten radiaciones y nosotros también. Lo que percibimos en nuestra piel es el balance del intercambio. En los casos citados anteriormente, la radiación que recibimos es más alta que la que emitimos en la porción de piel afectada.

Si los objetos del entorno están fríos, el balance puede ser negativo. Sin duda, el cuerpo más “frío” es el espacio sideral en cualquiera de las direcciones en las que no esté el sol. En una noche de verano con el cielo totalmente despejado y transparente, si nos tumbamos al aire libre, al no estar compensada nuestra radiación hacia el espacio, pues la que nos llega desde las estrellas es ínfima, nuestro enfriamiento por radiación, incluso con una temperatura del aire elevada, puede ser altísimo. Es un procedimiento bien conocido para poder conciliar el sueño en las noches calurosas. Y por la misma razón, en las despejadas, baja la temperatura del aire.

Para que se produzca intercambio por radiación entre dos cuerpos se deben poder “ver” entre sí, ya que el aire es transparente a la radiación. Por esa razón, no nos afecta ape-

nas la radiación del sol debajo de una sombrilla, o si la noche está nublada no es efectivo el procedimiento de enfriamiento nocturno, ya que las nubes actúan como una barrera para la radiación hacia el exterior y nos envían radiación.

La percepción del calor por conducción se produce cuando entramos en contacto con un objeto. Si su temperatura es, por ejemplo, de 50°C lo percibimos como caliente porque el intercambio de calor es positivo hacia nosotros, o lo contrario, cuando la temperatura es baja, como 5°C. Más adelante se vuelve sobre esta cuestión.

Obviamente, como casi siempre estamos en contacto con el aire y la vestimenta, la sensación térmica básica depende del signo del intercambio que establecemos constantemente con él a través de la ropa. Pocas veces no “tocamos” el aire. Una de ellas puede ser cuando nos bañamos en el mar, o también cuando tenemos el cuerpo “bañado en sudor”.

En realidad, la sudoración es el tercer método que tenemos para intercambiar calor con el medio, pero no deja de estar basado también en la conducción. Cuando el agua de nuestro sudor se evapora, debido a una corriente de aire, en realidad nos “roba” el calor de nuestra piel que necesita para ello a través de la conducción, y nos enfría.

La efectividad de la sudoración depende de la capacidad que tenga el aire que nos rodea de disolver más agua. Si su humedad relativa es del 100 %, es decir, no puede admitir más, por mucho que sudemos no conseguiremos evaporar ni un gramo de agua y no servirá de nada. Esta situación es la que se produce en climas cálidos y muy húmedos que percibimos como de ahogo y sofoco. Sudar sólo será útil cuando la humedad relativa del aire que nos rodea sea bastante inferior a la de saturación.

Las corrientes de convección facilitan todos los tipos de intercambios. Estas corrientes se deben al principio de Arquímedes aplicado al aire. Si una masa de aire se calienta, se expande, disminuye su densidad y sufre un empuje hacia arriba ejercido por las masas de aire vecinas, más densas por no haberse calen-

tado. Es el método utilizado por los globos aerostáticos. En el interior de un edificio, las corrientes de convección producen movimientos de las masas de aire que sirven para trasladar el aire calentado de un lugar a otro más frío.

Clima y configuración del edificio

El papel que pueden ejercer los edificios en todo este conjunto de desplazamientos del calor puede ser decisivo. Pueden actuar cortando la radiación del sol en verano o aprovechándola en invierno, o bien disminuyendo al máximo la conducción a través de los cerramientos exteriores con tal de evitar las pérdidas de calor en invierno o las ganancias en verano, o bien evitar o facilitar la convección debida a los movimientos de aire.

Pero este papel es muy diferente según sea el tipo de problemas que deba resolver. El factor principal a considerar es el clima general donde se encuentra el edificio; según sea éste, los mecanismos serán unos u otros. Por ejemplo, en un clima tropical (día y noche calientes, invierno caluroso), el interior de un edificio debe protegerse del sol directo y ha de estar muy ventilado transversalmente. En un clima desértico (día caluroso, noche fría e invierno temperado) el edificio ha de proteger del asoleamiento y equilibrar las temperaturas del día y de la noche, mediante una gran inercia térmica de toda la masa construida que debe poderse enfriar por la noche. En un clima muy frío (día frío, noche fría, verano corto), el edificio deberá minimizar las pérdidas del calor aportado por las instalaciones de calefacción.

Las regiones europeas templadas pueden ser una mezcla de todos los casos. En las fajas más cercanas al mar, el clima en verano puede parecerse a uno tropical, pero en invierno hace suficiente frío como para tener que minimizar las pérdidas de calor. En las zonas continentales, el calor del verano puede recordar los ardores del desierto, pero el invierno es muy frío. En general, se puede decir que son climas complejos. Los edificios deben ser pensados para el invierno y para el verano con mecanismos bien diferentes según una época u otra. La tarea del profesional de la arquitectura, nada fácil, será reunirlos todos en una concep-

ción general del edificio, analizando las condiciones microclimáticas que lo envuelven. Pero, en cualquier caso, deberá pensar en una nueva arquitectura, diferente de la que se desarrolló en la primera mitad del siglo xx, cuando todavía se creía en la inagotabilidad de los recursos naturales. Hoy ya es bien sabido que la energía cuesta mucho, contamina el ambiente y explota fuentes no renovables. Y la consumida en los edificios en su conjunto ya es superior a la de la industria y el transporte, sectores que han sabido adaptarse a las nuevas condiciones. Sin duda, la mayor aportación que puede hacer la arquitectura al desarrollo sostenible es proporcionar edificios de bajo consumo energético.

Para que no quede al arbitrio de la iniciativa particular, los poderes públicos han ido elaborando en la última década un conjunto extenso de normas de obligado cumplimiento a tal fin. En nuestro país se han ido implantando las Directivas Europeas correspondientes, que se han concretado en 2006 y 2007 en dos documentos fundamentales: el de Ahorro de Energía del CTE (CTE-HE) y el de la Certificación Energética de Edificios.

El primero regula, en diferentes secciones, los siguientes aspectos: en la HE-1, lo referente a los elementos constructivos; HE-2, las instalaciones; HE-3, la iluminación; HE-4, la energía solar para agua caliente; y HE-5, la energía fotovoltaica para energía eléctrica.

El segundo establece una clasificación de los edificios según sea su consumo final, de G (muy alto) a A (muy bajo), de manera similar a la ya existente sobre electrodomésticos. Se basa en la reducción al mínimo de la emisión de CO₂ que producen las instalaciones de calefacción, refrigeración, ventilación, agua caliente e iluminación. La clasificación es muy severa, ya que aunque se cumpla a rajatabla el CTE-HE, sólo se alcanzan índices medios, correspondientes a las letras D o E. Se parte de la suposición de que será la propia exigencia de los consumidores la que forzará a los promotores a conseguir niveles A para sus edificios.

Veamos cómo se puede alcanzar.

COMODIDAD TÉRMICA EN INVIERNO CON BAJO CONSUMO ENERGÉTICO

La esencia del problema es que hemos de conseguir una temperatura interior agradable alrededor de los 20 °C, mientras que en el exterior la temperatura es muy inferior, por ejemplo de 0 °C, y esto es imposible sin una aportación energética exterior.

Históricamente, la aportación energética se ha resuelto con las chimeneas o con las estufas de leña. En la actualidad existen bastantes soluciones mucho más efectivas, pero con los inconvenientes ya citados.

En cualquiera de los casos, lo que ha de hacer un edificio es:

- rentabilizar al máximo las posibilidades energéticas del combustible utilizado,
- disminuir las pérdidas energéticas de dentro a fuera, a través de los elementos de la envolvente,
- aprovechar al máximo las aportaciones energéticas gratuitas, y
- aumentar la comodidad por medio de los acabados que pueden entrar en contacto con la piel.

Veamos cada una de ellas por separado.

Rendimiento máximo de las instalaciones energéticas

Para aprovechar al máximo el combustible utilizado, lo primero es conseguir que las calderas funcionen de manera óptima, lo cual se consigue si se siguen las indicaciones del CTE-HE-2, que, a su vez, remite a la aplicación del RITE (Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios).

Además de lo anterior, debe conseguirse una correcta ubicación de los radiadores o difusores de calor para evitar que unas zonas se calienten en exceso mientras que otras no alcancen la temperatura deseada, situación que redundaría en un mayor consumo, ya que los usuarios de las partes más frías requerirán mayor cantidad de calor que quizá resulte excesiva para los de las calientes. Puede controlarse cada una de las zonas con termostatos o elementos de regulación parciales que pueden abarcar zonas o recintos individuales (III-2.2).

Reducción de las pérdidas de la energía utilizada

Aislamiento térmico de la envolvente

Es bien sabido que existen materiales muy conductores del calor, como los metales, tal como se comprueba al tocar el mango de un cazo de aluminio puesto al fuego sin aislante de ningún tipo. Obviamente son los menos indicados para evitar pérdidas energéticas.

También se sabe que la lana, por ejemplo, actúa justo en el sentido contrario, no es conductora sino lo opuesto, aislante, ya que se resiste mucho a conducir el calor. Todos lo hemos experimentado alguna vez en invierno al “envolvernos” con un confortable jersey de lana, que impide que nuestra calefacción particular, nuestro cuerpo, pierda demasiado rápidamente el calor que suministra. Una “envolvente” de lana ha sido uno de los procedimientos naturales mediante el cual determinadas especies animales han conseguido sobrevivir a los fríos inviernos. Si pudiéramos, envolveríamos en lana los edificios.

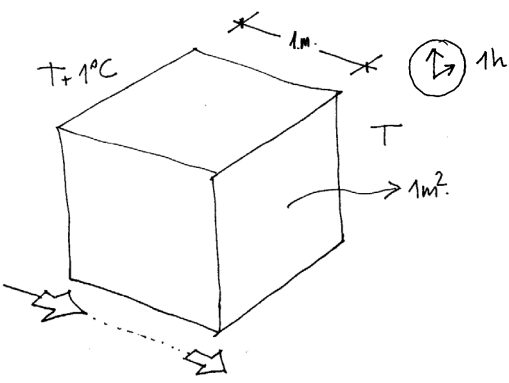
Pero existen materiales bastante más baratos que cumplen con mayor eficiencia el mismo papel, los denominados aislantes térmicos, que, en realidad, tienen una estructura material similar a la lana y por esa razón aíslan. Un ejemplo natural bien conocido es el corcho. Otros materiales artificiales son el poliestireno expandido, la fibra de vidrio o la lana de roca.

Todos los materiales aislantes, también la lana, lo que consiguen es retener en calma total pequeñas cantidades de aire en sus células. Resulta que el material más aislante de todos los existentes es el mismísimo aire, a condición de que esté absolutamente quieto, lo cual, a causa de las corrientes de convección, no es nada fácil. Y eso es lo que consiguen los materiales aislantes en sus pequeñas células o poros, inmovilizarlo, ya que en pequeños volúmenes no se producen esas corrientes.

La propiedad física que determina la acción aislante de un material se puede medir de una manera objetiva con la unidad siguiente:

λ (**lambda**), **conductividad térmica de un material**, es la cantidad de calor que atraviesa en unidad de tiempo la unidad de área y la unidad de espesor, cuando la diferencia de tem-

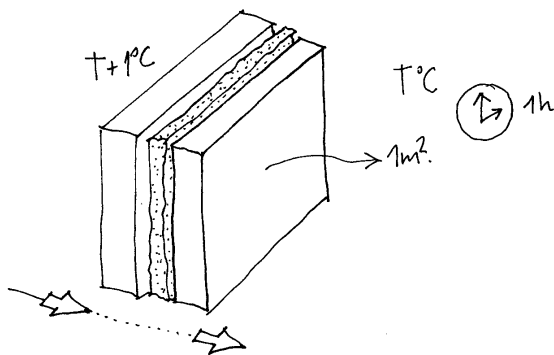
peratura es de 1 °C. Se mide en W/m²K, que equivale a 0,866 kcal/hm²°C. El cuadro adjunto contiene los valores de los materiales más usuales. Cuanto menor es el valor de un material, más aislante es.



Material	densidad kg/m³	conductividad W/m²K
cobre	8.900	384
acero	7.850	58
aluminio	2.700	205
rocas compactas	2.500-3.000	3,50
arena no desecada	1.700	1,40
arena seca	1.500	0,58
suelo con humedad natural	1.800	2,10
hormigón normal	2.400	2,00
hormigón con áridos ligeros	1.700	1,15
fábrica de ladrillo macizo	1.800	0,87
fábrica de ladrillo hueco	1.200	0,49
mortero de cemento	2.000	1,40
enlucido de yeso	800	0,30
vidrio para ventanas	2.500	5,4
madera conífera	600	0,14
moqueta	1.000	0,05
lana de vidrio (tipo 1)	10-18	0,044
poliestireno expandido (tipo 1)	10	0,057
aire		0,026

Pero los materiales siempre forman parte de cerramientos en las fachadas, cubiertas etc., y la acción aislante de éstos se mide con otra unidad que resulta de la combinación de las propiedades aislantes de los materiales componentes y de sus respectivos grosores:

U, transmitancia térmica de un cerramiento, medida también en W/m²K, es la cantidad de calor que atraviesa en una unidad de tiempo la unidad de área del cerramiento, cuando la diferencia de temperatura es de 1 °C.



El siguiente cuadro indica las U de algunos casos como referencia general.

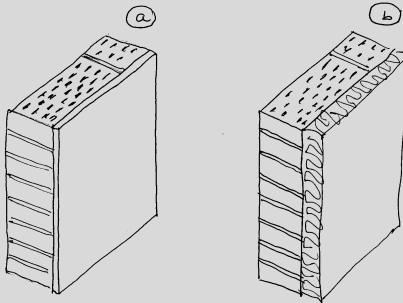
Fachadas de fábrica de ladrillo

1) a) ladrillo perforado, yeso

$U = 2,26$

b) con capa de 4 cm de material de aislamiento de $\lambda = 0,038$

$U = 0,64$

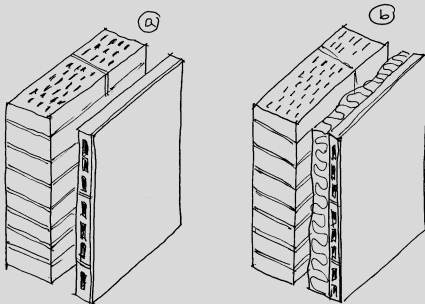


2) a) ladrillo perforado, mortero, cámara de aire, ladrillo hueco, yeso

$U = 1,29$

b) con capa de 5 cm de material de aislamiento de $\lambda = 0,038$

$U = 0,52$



Ventanas

Con vidrio sencillo y carpintería metálica

$U = 6,5$

Con vidrio sencillo y carpintería de madera

$U = 5,5$

Con vidrio doble (6 mm de cámara) y carpintería metálica $U = 4,3$

Con vidrio sencillo y persiana exterior enrollable de plástico $U = 2,5$

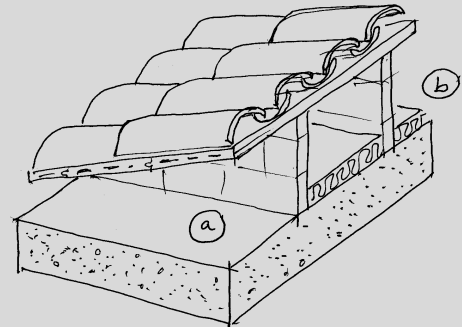
Cubierta con cámara

a) teja, mortero, machihembrado, cámara, forjado de hormigón

$U = 1,65$

b) con capa de 5 cm de material de aislamiento de $\lambda = 0,038$

$U = 0,49$



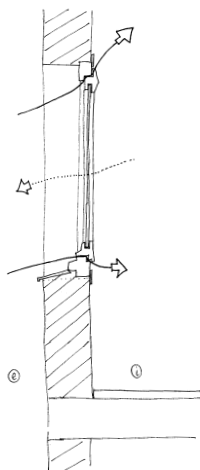
En realidad, los aislantes no impiden la pérdida de calor interior que tarde o temprano se transmite al aire exterior. Pero sí consiguen que la transmisión se produzca muy lentamente, lo cual permite mantener la temperatura adecuada con una pequeña cantidad de calor aportada por la calefacción.

Pero la envolvente de un edificio es un complejo conjunto de elementos de diversa naturaleza y la manera de aislar cada uno de ellos es bien diferente. Veámoslos por separado comenzando por los que lo tienen más difícil, las aberturas.

• Aberturas

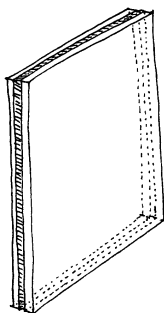
La primera condición que han de cumplir es que sean estancas al aire cuando estén en la posición de cerradas. No es un problema de aislamiento, sino de ajuste entre los perfiles de la carpintería.

Si hay un fuerte viento, el consumo energético puede ser alto para compensar al frío del aire infiltrado exterior a través de las carpinterías que no ajustan bien.



Supuesta la estanqueidad, el elemento fundamental que determina su capacidad aislante es el vidrio, que en sí mismo es un buen conductor del calor, tal como se comprueba en el cuadro de la página anterior.

Pero la técnica actual permite fabricar componentes formados por dobles vidrios con una cámara interior de aire desecado que pueden disminuir su U , ya que la estrechez de la cámara dificulta mucho las corrientes de convección y el aire actúa como aislante. Pero en



el mejor de los casos, siempre su U será el triple o el cuádruple de la U que se puede lograr fácilmente con las partes opacas.

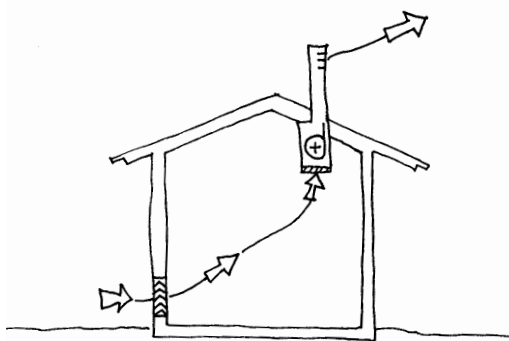
No se deben olvidar los sistemas de persianas o de protección de la luz exterior que pueden aumentar el aislamiento general durante la noche.

Sin duda, las ventanas o las aberturas en general son los puntos débiles de la envolvente. Las partes opacas son las que puede llegar a aislamientos muy elevados.

El CTE-HE-1 establece las exigencias de las U y de las de estanqueidad al aire (III-7.1.1).

Con todo, las nuevas carpinterías estancas originan un nuevo problema inexistente años atrás: la falta de ventilación. El CTE-HS-3 (I-6) obliga a renovar el aire interior del edificio con tal de lanzar al exterior los contaminantes que pueden afectar a nuestra salud, desde el CO_2 hasta todo tipo de sustancias, como las contenidas en el humo del tabaco.

Si se quiere alcanzar la máxima rentabilidad energética deberemos reducir al mínimo imprescindible el aire de renovación por medio



de instalaciones al efecto combinadas con entradas de aire en las partes opacas o por medio de nuevos diseños de las carpinterías que, además, recuperen parte de la energía que se pueda escapar a través de ellas por el efecto parietodinámico (III-7.1.1).

En todos estos casos es preciso proceder a un estudio económico depurado que justifique la fuerte inversión inicial que requieren estos sistemas teniendo en cuenta el ahorro energético que suponen, que obviamente dependerá del clima del lugar donde se encuentre. En cualquier caso, la ventilación es imprescindible y se ha de determinar cuál es el procedimiento que la aporta conociendo sus costes energéticos.

• Partes opacas

A causa de los niveles de confort que ya consideramos normales y de los costes de los combustibles, los procedimientos tradicionales para realizar las partes opacas, los muros homogéneos de fábrica de ladrillo o piedra, no aportan

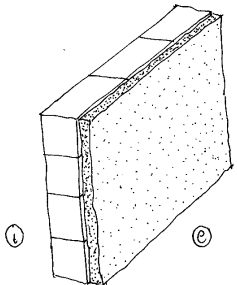
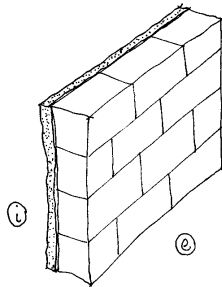
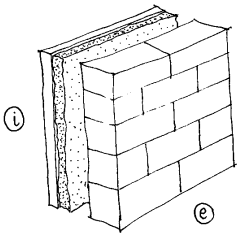
suficiente resistencia a la pérdida de calor. Es necesario incluir materiales con características aislantes específicas.

El material más barato sigue siendo el aire, y por esa razón, el procedimiento más utilizado antes de la crisis energética de la década de 1970 fue la cámara de aire, también útil como medio para evitar la entrada de agua, tal como se indica en I-3. La única condición es que debe tener un grueso reducido para dificultar la convección. En situaciones no demasiado severas de frío exterior puede seguir siendo un método útil.

Si se utilizan los procedimientos de fábrica de ladrillo convencionales y se necesita más aislamiento, es preciso añadir un material más aislante, como fibra de vidrio o poliestireno expandido, que se puede colocar de varias maneras:

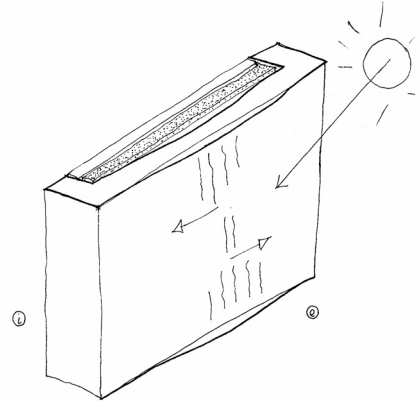
- en la cámara de aire,
- por el exterior del paramento exterior,
- por el interior.

En estos dos últimos casos no es necesario cámara de aire.

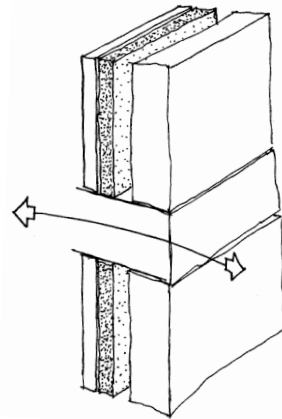


Si la U requerida es muy baja y se necesitan grandes espesores de aislante, la situación en la cámara no es demasiado conveniente porque puede producir dos efectos negativos:

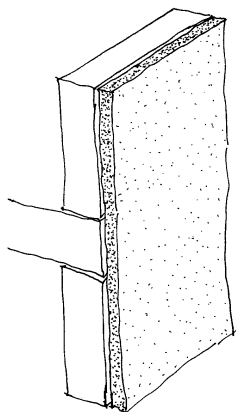
- en fachadas muy asoleadas, movimientos térmicos diferenciales excesivos, de los que se habla en I-11, que pueden ser perjudiciales para su conservación en buen estado, y



- en todo tipo de fachadas, puentes térmicos, es decir, zonas en donde es imposible colocar el aislante que se ha colocado en el resto del cerramiento, ya que al producirse pérdidas energéticas, se producen condensaciones, con las consecuencias negativas que se comentan en I-3.



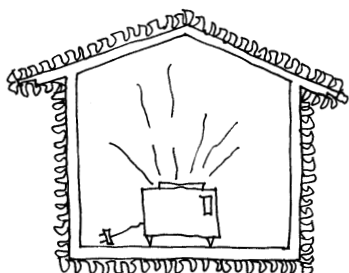
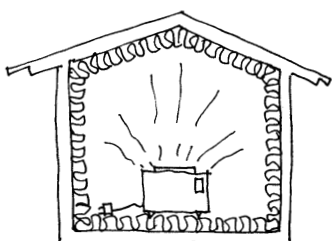
En estos casos es mejor adoptar una configuración constructiva diferente, como una solución que permita colocar el aislante por la cara exterior o como bloques aligerados de hormigón o cerámica suficientemente aislantes por sí mismos. Las soluciones concretas se proporcionan en III-7.2.



El CTE-HE-1 limita las pérdidas energéticas exigiendo unos valores mínimos de las U de los elementos de la envolvente según la zona climática donde esté situado el edificio (III-7, III-8, III-9 y III-10).

Inercia térmica del conjunto

En el caso de las fachadas de obra de fábrica, y en general en todos los casos, para decidir sobre la situación exterior o interior del aislamiento también se ha de analizar el régimen de uso del edificio. Para un edificio con un uso no continuo, por ejemplo, una iglesia o una sala pública que sólo es utilizada la mañana del



domingo, es más interesante que sus cerramientos permitan un calentamiento rápido de todo el ambiente interior e interesa que el aislamiento esté en la parte interior del edificio. Ocurre lo contrario si estamos en un edificio de viviendas de utilización continua.

La propiedad que rige esta cuestión es la inercia térmica, que depende de una característica de los materiales que se denomina capacidad térmica. Es la capacidad que tiene un material de almacenar calor y depende de su masa y de su calor específico. Es una propiedad habitualmente opuesta a la de aislante. Por ejemplo, las piedras tienen una gran capacidad térmica y son muy poco aislantes y, en general, los materiales aislantes tienen muy poca capacidad térmica.

A grandes rasgos, cuanto mayor sea la capacidad térmica de la masa construida de un edificio, más costará que cambie la temperatura de su interior frente a los cambios climáticos exteriores. Es el efecto que se produce en cualquier gran edificio de piedra, como en una catedral, donde la temperatura interior en verano se mantiene más baja que la del exterior. Esta propiedad del edificio se denomina inercia térmica.

La inercia térmica también puede tener un efecto positivo en la resolución de la renovación del aire interior del edificio (I-6). Si no disponemos de una instalación al efecto, esta ventilación se tendrá que efectuar a través de las ventanas. Si es así, en el caso de una vivienda interesa que el interior del edificio tenga el máximo de inercia, con tal de que mediante una rápida abertura de las ventanas se pueda renovar el aire sin producir una bajada apreciable de la temperatura radiante, debida a la temperatura constante de la masa construida interior.

A la vista de todo lo anterior se puede afirmar que en las fachadas de obra de fábrica de los edificios de viviendas, la solución más conveniente desde todos los puntos de vista comentados (aislamiento, inercia, puentes térmicos y durabilidad) es colocar el aislamiento por el exterior de la parte maciza de la fachada; pero es una solución contraria a la que habitualmente se acostumbra a hacer en nuestro

país y su adopción puede comportar serios riesgos por los posibles errores de los que las construyen ya que no les son conocidas.

En III-7.2 se exponen algunos de estos procedimientos y se comentan sus posibles inconvenientes.

En cualquier caso, la decisión final sobre la idoneidad de un cerramiento opaco, desde el punto de vista térmico, ha de considerar su posible papel en la comodidad en el período estival, tal como se comenta dos apartados más adelante.

Aprovechamiento de la energía solar gratuita

Puede hacerse mediante procedimientos pasivos o activos.

El término activo hace referencia a instalaciones que consiguen, mediante un captador, transferir la energía de la radiación directa al agua que circula por el captador, y por un sistema de tuberías distribuirla por el interior.

No se exponen aquí ya que, en la actualidad y para nuestro clima, son poco rentables como calefacción, aunque sí para la producción de agua sanitaria. Los cambios introducidos en los últimos años por la domótica y las calderas de alto rendimiento que permiten aprovechar al máximo los combustibles, han relegado estos procedimientos que hace sólo unos pocos años pudieron parecer la solución definitiva de calefacción.

El término pasivo se utiliza para todos aquellos procedimientos o mecanismos pensados para captar la energía solar con los elementos habituales de la envolvente, sin hacer uso de medios mecánicos, y aprovechando tanto como se pueda el efecto invernadero.

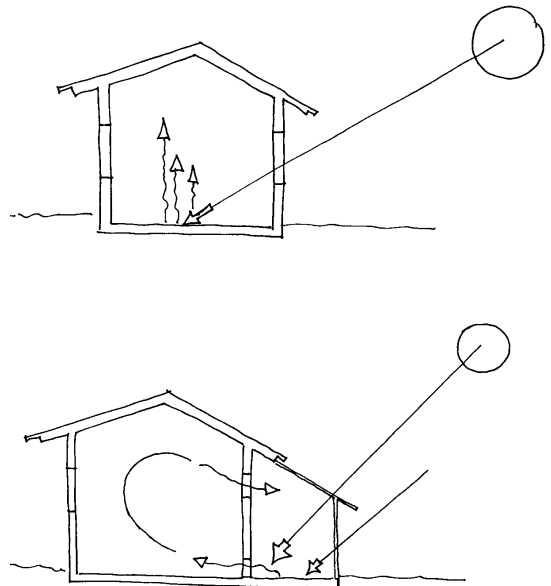
La parte de onda corta de la radiación del sol atraviesa casi totalmente los paneles de vidrio. Cuando el sol penetra a través de una ventana cerrada, aquella radiación calienta los materiales sobre los que incide. Éstos, como consecuencia de su aumento de temperatura, emiten también radiación, pero lo hacen en onda larga, que no puede atravesar el vidrio. De esta manera, una construcción cerrada totalmente con vidrio, como, por ejemplo, un

invernadero, es una especie de trampa para la radiación solar. Entra pero no sale.

Este efecto puede aprovecharse para disminuir el gasto de combustible, lógicamente, sólo en climas fríos pero muy soleados.

En el caso en que se considere este ahorro energético prioritario, la forma arquitectónica, adoptando soluciones poco convencionales que además aumenten el aislamiento y la inercia térmica, puede ser decisiva.

Pero en los edificios más convencionales también es posible ese aprovechamiento gratuito, intentando captar el máximo de energía solar a través de los vidrios de las aberturas habituales durante el período de invierno, pero evitando las pérdidas durante la noche. Si queremos incrementar la captación, utilizaremos los espacios intermedios cerrados, tales como galerías acristaladas, que pueden actuar de invernaderos y, mediante un adecuado sistema de puertas o ventanas interiores, desplazar el calor al espacio interior que lo requiera según



sea el momento del día. La protección nocturna del espacio semiexterior es imprescindible. En todos los casos, la inercia térmica de los elementos que reciben directamente la radiación puede alargar el período de retorno del calor acumulado en las horas nocturnas.

Materiales de contacto cálidos

El contacto de la piel con los materiales del edificio es uno de los parámetros que influyen en la comodidad térmica y que se acostumbra olvidar ya que en apariencia no tiene influencia directa en el gasto energético. Pero como la propia experiencia nos muestra, no es lo mismo estar en invierno en un local con suelo de mármol que con una moqueta de lana. En el primer caso, con certeza, para compensar la frialdad del contacto con la temperatura del aire, aumentaremos el gasto de la calefacción. Y aunque no sea así, es obvio que en un edificio pensado para pasar cómodamente un invierno, los elementos con que entra en contacto la piel de los usuarios no deben ser pétreos y fríos. Habitualmente, es el usuario el que acaba de adecuar su comodidad térmica con la elección de los materiales del equipo, como las alfombras de quita y pon que proporcionan calidez en invierno y que, una vez retiradas en verano, nos permiten disfrutar de la frialdad de un suelo pétreo.

Esta sensación puede medirse de manera objetiva mediante la variable denominada penetración térmica, que depende del calor específico, de la conductividad térmica y de la densidad del material.

El contacto con la piedra siempre nos da una sensación de frío; por contra, con la madera, el corcho o los aislantes térmicos como el poliestireno expandido es una sensación de calor. Cuanto más pequeña sea la penetración térmica de un material, más próxima a la de nuestra piel se encuentra la temperatura de contacto con él. El cuadro indica los valores de penetración térmica de los materiales más usuales. Es un factor clave en la elección de los pavimentos (II-9.2).

Material	penetración térmica
aire	0,04-0,2
poliestireno expandido	0,38-0,56
corcho	1,7
madera	4,0-7,6
ladrillo	14
mortero de cemento	21
hierro	210

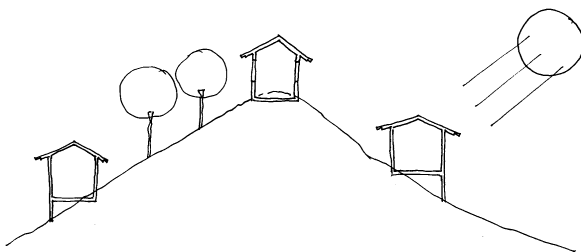
Forma y emplazamiento del edificio

Del análisis de los factores de los que dependen las pérdidas energéticas a través de la superficie de la envolvente, es fácil deducir que la forma general de los cerramientos y del edificio son variables que inciden de manera decisiva en el ahorro energético. Cuanto más compacto sea el edificio, es decir, cuanto más pequeña sea la superficie que rodea el máximo de volumen, más pequeñas serán las pérdidas. Sin llegar a utilizar la forma teórica más económica, es decir, la esfera, por su inadecuación a cualquier uso, siempre hemos de tender a minimizar la relación superficie exterior-volumen, haciendo los edificios lo más compactos posible (III-10).

La enorme diferencia entre las características aislantes de las partes opacas y los vidrios también nos hace ver que el ahorro energético lleva a reducir al mínimo las aberturas (III-7.2).

Es evidente que no son reglas fijas, sino tendencias que se han de considerar a la hora de diseñar un edificio.

Es necesario hacer, por último, una consideración sobre el emplazamiento del edificio, que es consecuencia lógica de todas las ante-



riores. En las ocasiones en las que tengamos libertad para escoger el emplazamiento tendremos que considerar las situaciones más favorables, teniendo en cuenta las siguientes variables,

- la orientación dominante (la sur siempre será la más favorable en el hemisferio norte), de cara a favorecer las ganancias gratuitas;
- en relación a la disminución de pérdidas, la situación respecto al viento, que será consecuencia de la altura del emplazamiento, que

puede cambiar por el tipo de vegetación que lo rodee. En general, la vegetación actúa a favor de evitar pérdidas por transmisión, ya que disminuye la fuerza del viento, pero por contra, puede disminuir el asoleamiento.

Ahora bien, todo esto acostumbra ser justo lo contrario en verano. El verano tiene requerimientos que a primera vista parecen contradictorios con los anteriores. Una buena arquitectura ha de hacerlos compatibles.

COMODIDAD TÉRMICA EN VERANO CON CONSUMO ENERGÉTICO CERO

Si queremos reducir a nada el consumo energético, el mismo edificio, con su forma y sus cerramientos, ha de conseguir que la temperatura interior o la de los espacios semiexteriores anexos, como los porches, sea lo más agradable posible.

Se han de considerar las tres estrategias posibles:

- disminuir las ganancias energéticas,
- aprovechar todos los posibles medios de enfriamiento natural, y
- disponer materiales de contacto densos y fríos.

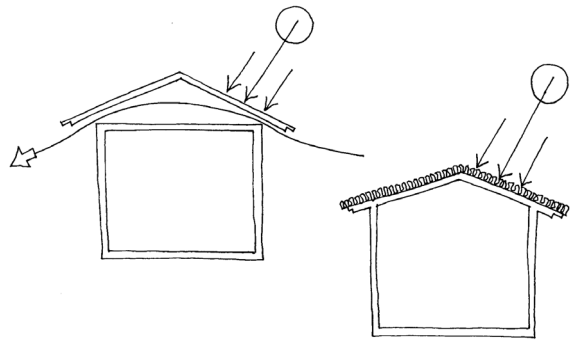
Si bien con estos procedimientos en un clima mediterráneo no podremos alcanzar una comodidad total en la canícula, sí serán suficientes para una buena parte de los períodos anteriores y posteriores.

Disminución de las ganancias energéticas

Protección de los rayos solares

Es una exigencia que afecta básicamente a las cubiertas y a las fachadas orientadas a sur o poniente, y dentro de ellas especialmente a las aberturas.

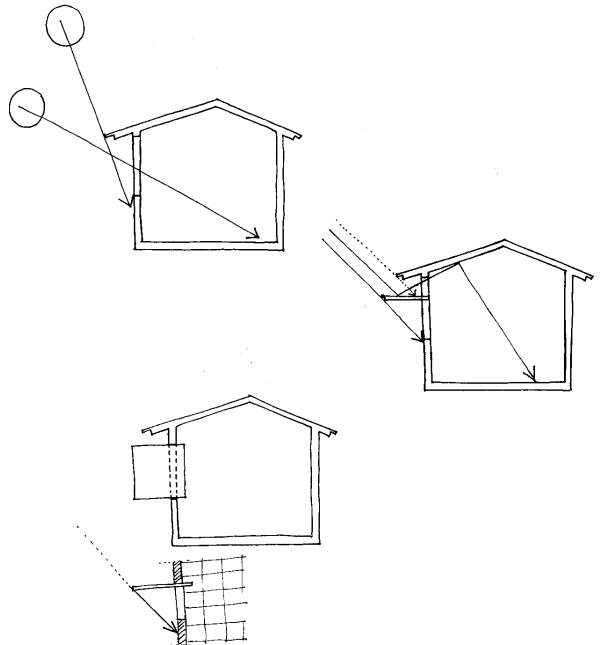
Para las partes opacas podemos disponer de dos procedimientos, utilizar, como cuando vamos a la playa, una sombrilla, o, paradójicamente, seguir utilizando el jersey de lana. Las partes opacas de las cubiertas se pueden resolver mediante una cámara de aire ventilada tal como resolvió la arquitectura popular y la

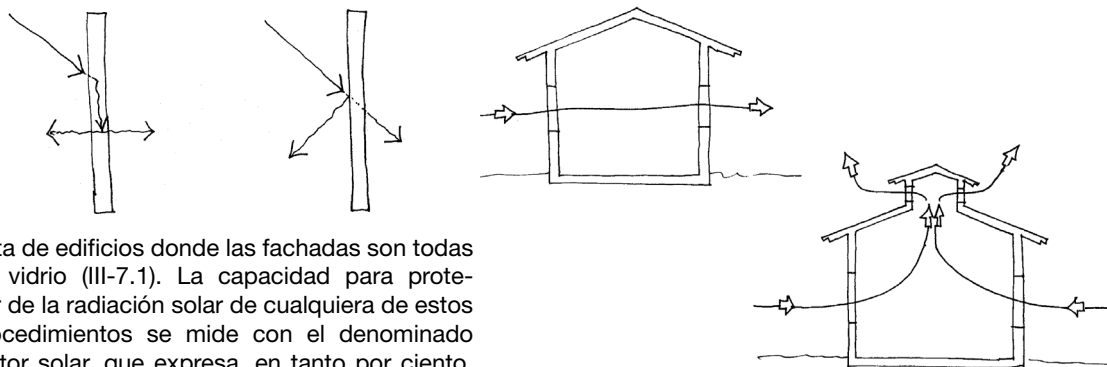


culta durante muchos años, haciendo cubiertas con espacios superiores ventilados como las buhardillas o bien mediante un aislamiento térmico del mismo tipo citado en el apartado anterior (III-9.1 y III-9.2).

Las partes opacas de las fachadas afectadas pueden utilizar también los dos procedimientos (III-7.2).

Para las aberturas de las fachadas sólo es útil la sombrilla mediante dos caminos: o bien añadiendo protecciones solares, que pueden ser de muchos tipos, como voladizos, *brise-soleils* (parasoles), persianas exteriores, etc., o bien utilizando vidrios absorbentes o reflectantes. Este caso es imprescindible cuando se





trata de edificios donde las fachadas son todas de vidrio (III-7.1). La capacidad para proteger de la radiación solar de cualquiera de estos procedimientos se mide con el denominado factor solar, que expresa, en tanto por ciento, la radiación solar que entra por la abertura con los artilugios colocados en relación a la que entra sin ellos.

Las aberturas de las cubiertas presentan más dificultades frente al control de los procedimientos para hacerlas opacas. Si se quiere evitar la entrada de radiación directa, lo más eficaz es orientarlas hacia el norte, o bien hacia otra dirección, pero cuidando que la forma general del lucernario o de los partesoles añadidos eviten la entrada directa (III-9.3).

El CTE-HE-1 establece la exigencia sobre el factor solar según sea el clima del lugar y la orientación de los huecos (III-8).

Utilización de los medios naturales de enfriamiento

Aireación

A pesar de las protecciones solares exteriores, siempre hay un incremento de la temperatura general del edificio a causa de la radiación directa que no se consigue evitar del todo, del incremento de la temperatura del aire en general y también de la aportación de los ocupantes. Un método para contrarrestarla es la aireación.

La renovación del aire interior con una cierta velocidad, que podemos denominar aireación, tiene dos efectos claros:

- favorecer las pérdidas personales por evaporación del sudor, y,
- reducir la temperatura general del aire igualándola a la del exterior.

La forma general del edificio y la disposición relativa de las aberturas tanto en fachadas

como en cubiertas pueden favorecer mucho la aireación sin necesidad de disponer instalaciones al efecto. Lógicamente, todo ello también es favorable para la ventilación, entendida ésta como la renovación de aire imprescindible para la salud de los ocupantes del edificio, tal como se indica en I-6.

La disposición favorable más sencilla es la que se denomina ventilación cruzada, que se consigue mediante la ubicación de ventanas o aberturas en fachadas opuestas.

La fuerza capaz de desplazar el aire es el viento. Por ello este sistema sólo es válido en lugares donde existen como mínimo ciertas brisas constantes. El efecto se verá favorecido si la dirección entre las dos ventanas coincide con la de los vientos dominantes en la zona.

Si no es así, la otra fuerza motriz puede ser la convección. Si disponemos una abertura en la cubierta se pueden activar corrientes de aire ascendentes como consecuencia de las diferencias de densidad entre masas de aire con diferentes temperaturas. Es el denominado efecto chimenea. Cuanto mayor es la distancia en vertical de las aberturas, más intensa será la fuerza convectiva.

Los dos métodos pueden ser utilizados simultáneamente tanto para favorecer la comodidad térmica como la higiene, según se expone en I 6.

Los espacios intermedios semiabiertos protegidos de la radiación solar, como terrazas, galerías o porches, son un magnífico medio arquitectónico para aprovechar todos los efectos anteriores. El aprovechamiento es máximo

si el porche dispone además de una cubierta calada que aumenta el efecto chimenea, tal como un emparado, una pérgola o un umbráculo, como es bien sabido en muchas zonas mediterráneas.

Pero ninguno de los requisitos citados, ni el térmico ni el de higiene, serán fáciles de alcanzar si las aberturas dan a un espacio urbano con unos niveles de ruido por encima de lo admisible. La comodidad térmica, no sólo en verano sino de mayo a octubre, por medios naturales es difícil, por no decir imposible, en una situación urbana. Al menos con las soluciones que la arquitectura nos ha legado de un pasado en el que los ruidos eran sólo los naturales.

La solución, igual que antes, ha de venir de una ruptura con las adoptadas hasta ahora y la búsqueda de otras nuevas que, paradójicamente, podemos encontrar también en la tradición arquitectónica del pasado, con espacios intermedios semicerrados, de los que podemos encontrar también magníficos ejemplos, tal como se expone en I-7.

En definitiva, tal como se defiende en I-1, los espacios intermedios, semiexteriores o semiinteriores, presentan grandes posibilidades para alcanzar la comodidad ambiental por medios naturales.

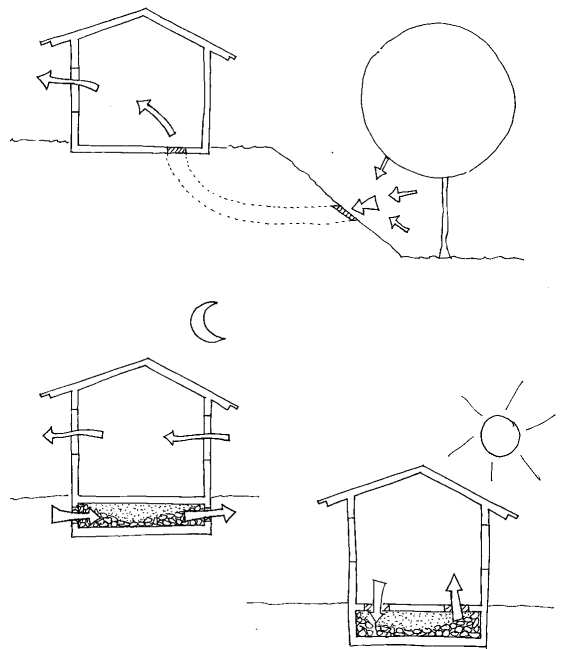
Acumulación

De manera equivalente, pero inversa a lo propuesto en el punto anterior sobre ganancias gratuitas del sol, se puede intentar conservar el frío producido por las bajadas de temperatura nocturnas, o incluso las estacionales, es decir, aprovechar las ganancias gratuitas de frío nocturno o invernal.

Para ello también es preciso dotar al interior del edificio de una gran inercia térmica, es decir, una gran masa construida dentro de los límites del aislamiento térmico. Si es así, la temperatura máxima del día se verá amortiguada por el relativo frescor que tendrán los cerramientos o la masa construida interior si se ha enfriado previamente. Es el efecto ya citado antes que se percibe al entrar en una catedral un día caluroso del principio del verano. Para aprovechar al máximo el efecto de enfriamiento

nocturno es necesario que circule intensamente el aire durante la noche por la masa interna del edificio, lo que requiere un sistema de aireación de los ya citados y estar en un clima en el que realmente disminuya la temperatura del aire durante la noche.

En las figuras aparecen unos ejemplos de mayor dificultad de aplicación, que consiguen aprovechar el frío relativo contenido en masas que, por su gran inercia y por estar protegidas de la radiación directa, no cambian apenas su temperatura a lo largo del año.



Emplazamientos, formas y materiales

Algunas de las conclusiones anteriores para el invierno son estrictamente simétricas para el verano.

La sensación de frescor puede estar reforzada con el efecto que producen sobre la piel los materiales con una alta penetración térmica, es decir, aquellos que pueden captar una gran cantidad de calor antes de calentarse, como las piedras o el mármol, tal como queda bien patente cuando se observan los pavimentos más usuales en los países cálidos.

Sobre la forma general del edificio, para los climas mediterráneos, sigue siendo conveniente, en general, la compacidad, que ha de venir acompañada por una buena dosis de espacios intermedios semiabiertos.

Sobre el emplazamiento idóneo para los edificios en verano se llega a conclusiones casi opuestas, laderas norte, zonas ventadas, etc. Pero se ha de recordar que la comodidad térmica sólo es un factor más de entre otros muchos. Sólo el análisis de casos concretos en los que es posible tener en cuenta la multitud de factores que inciden en estos niveles globales, incluida la opuesta comodidad entre invierno y verano, permite concretar estas generalidades. La decisión arquitectónica final ha de ser una auténtica solución de compromiso entre requerimientos antinómicos.

COMODIDAD TÉRMICA COMPLETA CON ENVOLVENTE TOTALMENTE ESTANCA

La máxima comodidad térmica teórica se consigue aislando totalmente el edificio del ambiente natural que le rodea dotándolo de envolventes totalmente estancas al aire exterior y de instalaciones de aire acondicionado (III-2.2), que controlan, tanto en invierno como en verano, tres de las variables de comodidad térmica, temperatura, humedad relativa y velocidad del aire, además de su calidad higiénica por medio de su renovación con aire exterior filtrado.

Si realmente son necesarias estas instalaciones en un edificio determinado, depende de multitud de factores entre los que se destacan cinco:

- el tipo de clima en que se sitúa el edificio,
- las disponibilidades financieras iniciales, ya que son instalaciones de precios elevados, si se desea que funcionen bien,
- los tipos de actividad que se desarrollan, especialmente las que generan concentraciones de usuarios, como las burocráticas, las de espectáculos, las comerciales, etc.,
- los tipos de elementos que configuran la envolvente, muchas veces decididos por razones diferentes a las térmicas, como pueden ser las de iluminación o las simbólicas,
- la actitud delante de los problemas energéticos.

En cualquier caso, si se decide su utilización en un edificio, su envolvente, además de ser hermética, ha de cumplir las exigencias expuestas en los dos apartados anteriores, salvo los que se relacionan con la ventilación que resuelve la misma instalación, es decir, con tal de disminuir al máximo el consumo energético, la envolvente deberá:

- reducir las pérdidas tanto en verano como en invierno, y,
- evitar las ganancias directas del sol en verano.

Sin duda, esta última exigencia es la que se acostumbra a olvidar con mayor frecuencia en nuestro país por efecto de las imágenes arquitectónicas adecuadas para los climas nórdicos pero no para los nuestros.

Pero la implantación de la Certificación Energética tanto aquí como en toda Europa, con su optimización de recursos energéticos y disminución de emisiones de CO₂, implica evitar radicalmente las ganancias en verano e introducirá cambios de gran calado en la arquitectura del siglo xxi.

TEMA 5. Luz

ARQUITECTURA Y PROPAGACIÓN DE LA LUZ

VARIABLES DE LA COMODIDAD VISUAL

- Nivel de iluminación
- Deslumbramiento

FACTORES INFLUYENTES EN LA ILUMINACIÓN NATURAL

- En el nivel de iluminación
 - Clima*
 - Entorno*
 - Forma del edificio*
 - Forma y situación de las entradas de luz*
 - Paramentos interiores*
- Cuantificación de la iluminación natural
- En el deslumbramiento
 - Forma y situación de las entradas de luz*
 - Paramentos interiores*

LA ILUMINACIÓN ARTIFICIAL

ARQUITECTURA Y PROPAGACIÓN DE LA LUZ

La **luz** es la parte del espectro de la radiación electromagnética a la que es sensible la retina del ojo humano. Está formada por radiaciones de diferentes frecuencias y longitudes de onda. La luz natural es la que proviene del sol y contiene de una forma homogénea todas esas longitudes de onda visibles. Es una luz blanca. La luz artificial es la que puede producir el hombre mediante incandescencia, fluorescencia, combustión de gas, etc. Habitualmente contiene diversas proporciones de diferentes frecuencias y puede, en consecuencia, tener otro color.

La **iluminación** se define como la acción y el efecto de iluminar o de dar luz a algún objeto.

La iluminación es una de las claves de la percepción de la arquitectura. De hecho, lo que vemos de ella son los juegos de las luces directas, indirectas, difractadas, reflejadas, absorbidas por sus superficies, por sus volúmenes, por las sombras arrojadas, etc. La percepción del exterior de los edificios está basada funda-

mentalmente en su iluminación natural, y la percepción del espacio interior viene totalmente condicionada por el tipo y la situación de las aberturas en los paramentos que lo definen.

Si añadimos que la correcta iluminación es esencial para la comodidad en todas las operaciones en las que está involucrada la vista, habremos destacado la importancia capital de este tema para un profesional de la arquitectura.

Es interesante destacar las diferencias entre la propagación de la luz y la propagación del sonido que se estudia en I-7. En la mayoría de las ocasiones, el sonido que escuchamos es el producido directamente por la fuente, que se denomina "el campo directo". Éste siempre está complementado por el campo reverberado que se produce por reflexión de las ondas sonoras directas en las superficies del recinto que nos rodea. En la mayoría de las ocasiones, el campo directo es mucho más intenso, y casi siempre es el que realmente nos interesa.

Por contra, en cuanto a la visión, lo que vemos en la totalidad de las ocasiones son luces reflejadas. Es evidente que nunca miramos al sol ni a las bombillas. De manera que, de la luz, no nos interesa tanto sus características en sí misma, sino los efectos en las superficies que ilumina y que a su vez nos iluminan a nosotros. En consecuencia, el factor más importante a considerar en la iluminación son los valores según los cuales la luz del sol o la de las luminarias se refleja en las diferentes superficies antes de llegar a nuestros ojos.

El **nivel de iluminación** es la variable que mide la intensidad de luz que incide sobre una superficie. La unidad de medida, es el "lux". Más que definirla con exactitud, es más útil ahora conocer los valores que toma en situaciones conocidas. En el espacio exterior del edificio en un día despejado se puede alcanzar un nivel de unos 50.000 lux. Si el cielo está cubierto se puede quedar en 5.000 lux. Por la noche, si hay claro de luna, puede alcanzar 0,7 lux, y en una calle iluminada, de 20 a 50 lux. En un interior sin entrada directa de sol, junto a la ventana se puede alcanzar unos 2.000 lux. En interiores poco iluminados el nivel puede ser del orden de 200 o 100 lux.

Como veremos después, el nivel de iluminación es uno de los factores clave para considerar cómoda una determinada iluminación.

La relación entre la cantidad de luz incidente y la reflejada en una superficie como consecuencia de su tono claro o oscuro es el **coeficiente de reflexión** de dicha superficie. Una superficie totalmente blanca puede llegar a tener un coeficiente de reflexión casi cercano al 1, por contra, una superficie pintada de oscuro mate puede llegar al 0,01.

La luz blanca del sol incide sobre los objetos y éstos absorben parte de la radiación de una forma selectiva como consecuencia de la estructura molecular y atómica de sus superficies, ya que el coeficiente de reflexión es diferente para cada una de las ondas o longitudes de onda. La luz reflejada es distinta de la incidente. Si se reflejan todas de una forma homogénea, estamos ante un objeto blanco; si no se refleja ninguna, estamos ante uno negro; si se absorben el azul y el verde sólo se refleja la roja, precisamente vemos el objeto de color rojo, etc.

Se ha de distinguir entre la iluminación producida sobre el elemento que queremos iluminar directamente por el foco luminoso y la que incide sobre el objeto a partir de reflexiones en las superficies circundantes.

En la iluminación natural, en pocas ocasiones hablaremos de luz directa del sol, ya que produce un exceso de luz molesto. En la práctica totalidad de los casos sólo consideraremos la luz que ha sido sometida a varios reflejos: el primero en la propia bóveda celeste, que podrá ser más o menos brillante según el día esté nublado o despejado; después en los edificios que circundan al que estamos considerando; y por último el de los paramentos interiores del local en el que estamos situados.

Diferente es el caso de la iluminación artificial donde la iluminación directa tiene muchísima más importancia.

VARIABLES DE LA COMODIDAD VISUAL

La capacidad del ojo humano para distinguir detalles de pequeño tamaño se denomina **agudeza visual**. A un nivel muy bajo de luminosidad de la superficie que estamos observando, el ojo sólo puede ver formas sencillas y no puede distinguir los colores entre sí. A partir de un determinado nivel de iluminación podemos distinguir los colores, pero no podemos leer si la letra es pequeña; pero si aumenta el nivel de iluminación, podemos llegar a leer. Si sigue aumentando hasta llegar a la que se obtiene colocando una superficie directamente al sol, el efecto puede ser el contrario y dejar de poder leer otra vez. Por todo ello, el **nivel de iluminación** pasa a ser clave con relación a la comodidad.

Nivel de iluminación

Según todo lo dicho anteriormente, un edificio, y los cerramientos que lo conectan y aíslan del exterior, será adecuado en cuanto a la iluminación natural, o bien su procedimiento de iluminación artificial, cuando nos permita obtener el nivel de iluminación adecuado a la actividad que realizamos. La actividad pasa a ser, tal como queda puesto de manifiesto en el resto

de temas relacionados con el ambiente, una cuestión clave.

Los valores que se recomiendan están entre los 2.000 lux y 1.000 lux para actividades de precisión, 700-800 lux para lectura y dibujo, y 200-300 lux para actividades que no requieren una especial atención de la vista.

Pero es importante no olvidar que las actividades varían a lo largo del día. En determinados momentos es imprescindible un nivel alto de iluminación porque estamos leyendo; en otros, la oscuridad completa, no sólo para dormir (que también), sino para hacer una proyección de diapositivas en un aula de un edificio escolar; o en otros, sencillamente una penumbra que nos permita relajarnos, pero sin llegar a la oscuridad total que puede, a su vez, incomodarnos. Es decir, como las actividades pueden tener muchas variantes o momentos con necesidades de iluminación diferentes, tan importante es obtener un determinado nivel de intensidad como poder regularlo a nuestra voluntad.

La comodidad también depende de la situación de la persona en relación con la dirección de donde proviene la luz. Una persona diestra que escribe necesita que la luz venga del lado izquierdo para evitar que la mano derecha proyecte sombra en el papel. También es incómoda una luz que proviene de atrás porque proyecta la sombra de la persona sobre el plano de trabajo, etc. Otros trabajos necesitan que la luz venga de costado y no de frente para evitar precisamente el deslumbramiento.

Nuestros ojos también se adaptan automáticamente a los cambios de intensidad de la iluminación. Los párpados constituyen el sistema más eficaz ante un exceso de iluminación. Pero también las pupilas de una forma mucho más sutil y no controlada por la voluntad cambian de tamaño con bastante rapidez en respuesta a las condiciones de iluminación, regulando así la cantidad de luz que entra en los ojos. El tercer mecanismo de adaptación, más lento todavía, se da en la propia retina.

Nuestra propia experiencia nos muestra que tan desagradable es la falta o el exceso de iluminación como que ésta cambie a más o a menos en un lapso corto, ya que el ojo re-

quiere cierto tiempo para adaptarse a las nuevas condiciones. En un ambiente natural no constituye ningún problema, pero dentro de los edificios adquiere una gran importancia.

Deslumbramiento

El segundo aspecto a considerar en cuanto a la comodidad es el deslumbramiento. Un ejemplo puede ser el que se produce en un aula cuando el profesor está delante de una ventana en un día en que entra mucha luz. No vemos la cara del profesor (y lo que más nos inquieta es que él sí que nos la ve a nosotros). O también cuando tenemos la ventana justo al lado de la pizarra en la que el profesor está escribiendo y la luminosidad exterior nos impide ver lo que escribe ya que el ojo se adapta al nivel más intenso del exterior. Otro ejemplo se nos presenta en un pasillo interior de un edificio iluminado solamente por una ventana situada en su extremo. El efecto puede llegar a ser equivalente al deslumbramiento que nos producen los faros de un coche durante la conducción nocturna.

Si al lado de un objeto muy luminoso situamos otro oscuro, se producirá un efecto desagradable, ya que si el ojo se adapta al luminoso, no podrá ver el oscuro, o si se adapta al oscuro, será incómodo el efecto del muy luminoso. Cuando el mismo objeto oscuro lo colocamos sobre un fondo todavía más oscuro, sin ningún tipo de objeto luminoso presente, aparecerá como mucho más luminoso y será visto con todo detalle, ya que el ojo se habrá adaptado a su nivel de luminosidad.

En consecuencia, uno de los factores de la comodidad es la presencia o ausencia de diferentes grados de luminosidad simultáneas delante de los ojos, lo que habitualmente se denomina deslumbramiento.

Concluyendo, los edificios y sus elementos reguladores de la entrada de luz natural y los procedimientos de iluminación artificial han de permitir el nivel de iluminación adecuado, no producir deslumbramientos y adecuar los diferentes niveles a la velocidad de circulación por su interior.

Pero con todo lo anterior no agotamos las variables que inciden en la percepción visual, muy condicionada por aspectos psicológicos. Quedan muchos factores sin analizar, como, por ejemplo, el color de la luz en caso de que ésta sea artificial, si es cálida o fría, etc., o que tampoco es una solución perfecta conseguir el máximo de homogeneidad de iluminación, ya que para que la visión sea agradable tiene que existir cierto contraste entre superficies, etc. El lector deberá acudir a obras de especialidad si desea conocer más a fondo estas cuestiones.

Es obvio que uno de los principales inconvenientes de la luz natural es que su intensidad y dirección es variable a lo largo del día según sea la posición del sol en el transcurrir del tiempo y que, evidentemente, a partir del anochecer es inutilizable. Es imprescindible el complemento de la luz artificial, y un buen edificio incluye un correcto diseño de ambas iluminaciones, cada una por sí misma, pero también relacionándose entre sí.

Con todo, no se olvide que el ojo humano es el resultado de un dilatadísimo proceso evolutivo durante el cual sólo ha estado en contacto con la iluminación natural. Si bien es exagerado afirmar que la artificial puede dañarle, es razonable utilizar siempre que sea posible la luz que proviene del sol como medio en el que se desenvuelve mejor la psique humana.

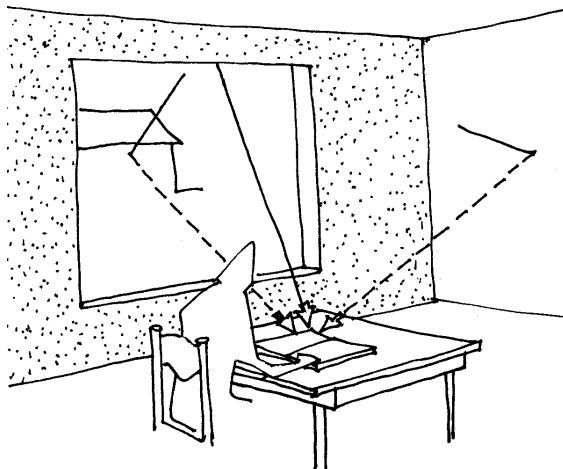
La disminución del gasto energético es una razón más para aprovechar al máximo lo natural. Véase al final del tema lo que a tal efecto prescribe el CTE-HE-3.

Por todo ello, en este tema se presta la máxima atención a los modos de conseguir una iluminación natural máxima.

FACTORES INFLUYENTES EN LA ILUMINACIÓN NATURAL

En el nivel de iluminación

Si pretendemos conseguir un nivel de iluminación natural determinado sobre un plano de trabajo, tal como se puede ver en la figura, la cantidad de luz que llega a él procedente de la luz solar será:



- la que entra directamente desde la bóveda celeste pero no directamente desde el sol,
- la reflejada en los edificios u objetos que están frente a la ventana, y
- la reflejada a su vez directamente en los paramentos que delimitan el propio recinto.

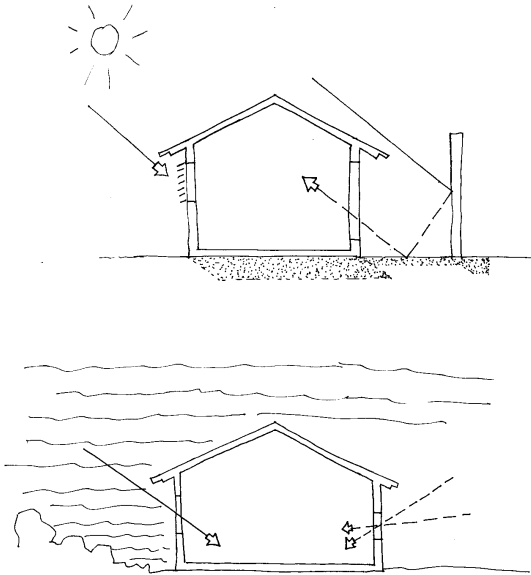
Estas tres variables nos indican los análisis que se deben realizar simultáneamente para estudiar el nivel de iluminación natural medido en lux.

La cantidad de luz que provenga del cielo será consecuencia del clima, y las otras dos del entorno del edificio o de su propia forma tanto exterior como interior, y de la forma y situación de las ventanas. La relación porcentual entre el nivel de iluminación exterior y el interior es el coeficiente de iluminación natural. Puede oscilar entre el 0 % y 12 %.

Clima

Consideraremos dos casos extremos y mediante su combinación la mayoría de los casos posibles.

Por un lado, el clima desértico de atmósfera totalmente limpia con una bóveda celeste de intenso color azul. La luz que proviene de la bóveda es relativamente baja y si queremos que entre más luz del sol (nunca directamente), será imprescindible colocar alrededor de nuestro local paredes que lo reflejen y al tiempo evitar la entrada directa mediante artífugos de los



que ya hablaremos después, tales como persianas, parasoles, etc.

En la situación opuesta nos encontraremos si estamos en un clima propio de las regiones nórdicas, con un cielo encapotado, pero todo él con una intensidad luminosa elevada. Tendremos una luz difusa y el factor más influyente será la relación directa o no de la bóveda celeste con el plano de trabajo.

Casos intermedios pueden darse en diferentes zonas climáticas o bien en diferentes momentos de las estaciones del año o en diferentes momentos del día como consecuencia de la variabilidad del tiempo meteorológico. Para cualquier caso, deberemos estudiar cuáles son las situaciones más frecuentes y las más extremas.

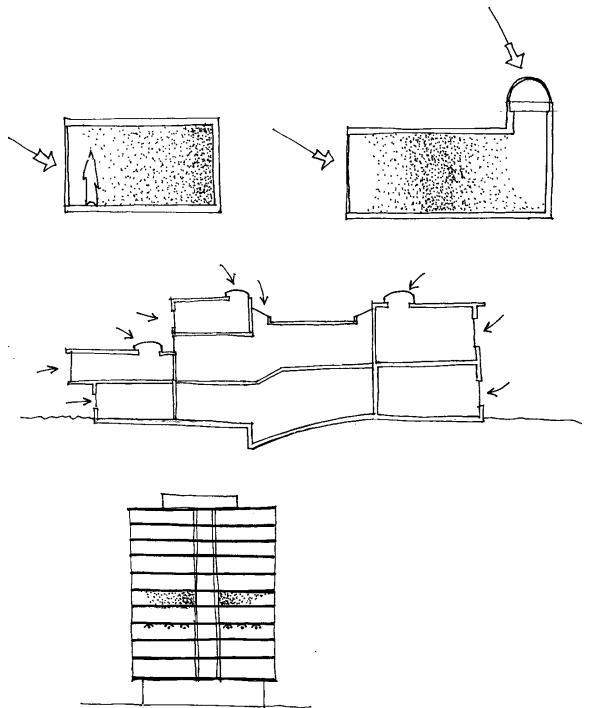
Entorno

Éste será más o menos importante en función de la situación que nos encontremos de las dos citadas anteriormente. Si nos encontramos en el primer caso extremo, la importancia del entorno pasa a ser fundamental, ya que los objetos iluminados (fachadas, paredes, etc.) situados alrededor son la principal fuente de luz exterior. En el segundo caso, el entorno pasa a ser prácticamente irrelevante pues poco

aumentará la intensidad luminosa respecto a la que nos provenga directamente de la bóveda celeste.

Forma del edificio

Esta es la variable que puede dominar totalmente el arquitecto al realizar su proyecto. La forma del edificio y de sus locales es totalmente determinante. En un local con una ventana a toda su altura, su profundidad no puede ser de más de 7 metros, ya que el nivel de iluminación en este punto empieza a ser ya escaso. Si esa profundidad no puede ser menor, se debe utilizar iluminación cenital,



suponiendo que estemos en la última o penúltima planta del edificio. Si, por contra, estamos en un edificio de muchas plantas, para profundidades mayores de 6 o 7 m la única solución es la iluminación artificial.

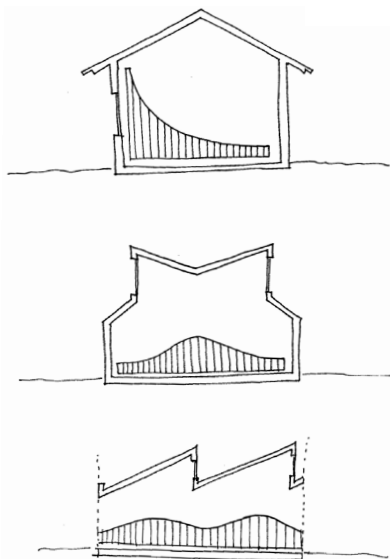
Un ejemplo de edificio en el que la iluminación cenital pasa a ser de importancia capital puede ser una biblioteca de las que la historia de la arquitectura cuenta con magníficos ejem-

plos; o bien los edificios escolares que acostumbra ser de una o dos plantas y, en consecuencia, la luz cenital es fácilmente aprovechable. Pero recuérdese que uno de los requisitos fundamentales de la luz natural es que ha de ser fácilmente regulable. Si el local en cuestión es un aula, será poco adecuada la luz cenital ya que habitualmente es difícil su control para conseguir una oscuridad absoluta. Siempre es imprescindible pensar en la iluminación y al mismo tiempo en su control.

Forma y situación de las entradas de luz

Ya en el punto anterior han surgido los dos tipos fundamentales de entradas de luz, los situados en las fachadas, ventanas o puertas, y los situados en las cubiertas, que pueden ser de varios tipos como veremos en el punto siguiente.

Supuesto un edificio aislado, la intensidad luminosa interior será mayor cuanto mayor cantidad de bóveda celeste pueda verse desde el plano de trabajo que queremos iluminar a través de la entrada de luz. Las ventanas altas o las entradas de luz en el techo son las que proporcionan mayor cantidad de luz. En la figura se representa, mediante sus valores relativos en ordenadas, los diferentes niveles de iluminación que se obtienen según sea la posición con relación a las entradas de luz.



Ahora bien, la iluminación no es la única variable que se debe tener en cuenta, sino también el control de la radiación térmica en verano.

Por esta razón, son poco habituales las luces cenitales en un clima como el nuestro. Sólo serán útiles en edificios en los que el nivel de iluminación ha de ser permanente, como pueda ser un museo o una fábrica. Las entradas de luz han de estar diseñadas de manera que no permitan la entrada directa de los rayos de sol, sino que la iluminación se produzca a través de superficies reflectantes. Los elementos que más se adaptan a esta situación son los lucernarios con vidrios verticales, o las cubiertas en diente de sierra, todos ellos orientados al norte (III-9.3 y III-7.1.1).

Paramentos interiores

Su influencia en la iluminación natural obviamente depende de su capacidad de reflejar la luz que sobre ellos incide. Cuanto más blanco sea el color, mayor será esa reflexión. Ésta se mide con el coeficiente de reflexión en tanto por uno, que relaciona la cantidad de luz reflejada con relación a la incidente. Una pared blanca de yeso puede alcanzar un coeficiente de 0,8. Los colores que podemos denominar pastel, pueden reducir ese coeficiente a 0,6-0,5, unos colores oscuros hasta 0,3.

Cuantificación de la iluminación natural

A diferencia de lo que sucede con la iluminación artificial, no es posible fijar la exigencia de iluminación natural interior mediante un número mínimo de lux, debido al carácter variable de la iluminación exterior.

La exigencia habitualmente se formula mediante el denominado factor medio de luz diurna, que mide, en tanto por ciento o en tanto por uno, la relación existente entre la iluminación del interior de un local y la iluminación que existiría en ese mismo punto si el edificio no estuviera construido.

Las diferentes normativas establecen este porcentaje según la actividad que se desarrolla en el local. Así, por ejemplo, en las viviendas es

recomendable un mínimo de 0,02 y para las aulas escolares el 0,03. En el primer caso para una iluminancia exterior de 5.000 lux, en el interior se obtendrán 100, si en el exterior es 10.000, se conseguirán 200.

Si el coeficiente es de 0,05, la iluminación conseguida puede denominarse como vivaz o luminosa, mientras que si es inferior al 2 %, habitualmente es necesaria una iluminación artificial.

Existen diversos procedimientos de cálculo que permiten prever el factor medio de luz diurna a partir del análisis de la configuración de la abertura y del entorno. En III-8.3 se expone uno de ellos.

En el deslumbramiento

Según su grado, puede clasificarse en deslumbramiento total y deslumbramiento molesto. Está claro que el primero ha de ser absolutamente proscrito, ya que puede afectar a la seguridad de las personas que en determinado momento puedan estar cegadas y, en consecuencia, limitar su capacidad para el movimiento en el edificio. Es un caso que se da con poca frecuencia, pero cabe dejar constancia de la posibilidad de que ocurra. El más habitual es el producido por la presencia simultánea en nuestro campo visual de objetos iluminados con intensidades muy contrastadas o diferentes. Este es el caso que ocurre por desgracia con mucha frecuencia y que impide la correcta adecuación de los edificios a la actividad de los usuarios. Todo ello depende fundamentalmente del tipo de abertura.

Forma y situación de las entradas de luz

La pared que rodea una ventana o sus paramentos internos, el telar, el capialzado, el alféizar o la repisa interior, pueden disminuir el deslumbramiento producido por la entrada de luz directa de la ventana si están pintados de color blanco; igual ocurre con el color de la carpintería.

Los medios de control de la entrada de luz son muy útiles para controlar los efectos del deslumbramiento. Nuestra propia experiencia

doméstica nos hace ver que en muchas ocasiones el tamizar la luz mediante tejidos traslúcidos, habitualmente conocidos por visillos, tienen dos efectos simultáneamente: por un lado hacer la luz más difusa, de manera que se convierten en pantallas difusoras de la luz que reciben y, además, también tienen el efecto mediante esta difusión de reducir los contrastes excesivos y el deslumbramiento. Son unos elementos que si bien no forman parte del proyecto del arquitecto, debe conocer sus efectos y considerarlos en sus diseños. Si se trata de un edificio público en el que los usuarios no van a tener el cuidado que se tiene habitualmente en las viviendas, el arquitecto tendrá que suplir los efectos beneficiosos de visillos y cortinas por procedimientos menos domésticos.

Paramentos interiores

Cuanto más clara sea la superficie de los paramentos interiores menos posibilidades habrá de contrastes excesivos con las luces que procedan directamente del exterior.

LA ILUMINACIÓN ARTIFICIAL

La iluminación artificial se obtiene mediante la transformación de la energía eléctrica en energía luminosa, por incandescencia o por fluorescencia.

Las diferencias con la iluminación natural son muchas y obvias. En primer lugar, podemos disponer de ella a nuestra voluntad en el espacio y el tiempo, distribuirla de la manera más conveniente por el edificio, y utilizarla a la hora que la necesitemos, independientemente de la situación del sol en el exterior. Pero a cambio de un coste energético bien contrario a la gratuidad total de la natural.

Tanto es así, que el CTE-HE-3 obliga a organizar la instalación eléctrica de iluminación artificial de las diferentes zonas de un edificio de manera que dispongan de:

- un sistema de control que permita ajustar el encendido a la ocupación real de cada zona, y
- un sistema de regulación que optimice el aprovechamiento de la luz natural en las zonas próximas a las fachadas.

Cada zona deberá tener:

- un sistema de encendido y apagado manual diferente del de los cuadros eléctricos,
- un sistema de apagado de la luz eléctrica de la franja de 3 m de ancho contigua a las fachadas al exterior o a patios interiores en las que realmente penetre luz natural.

En III-2.3 se describe con mayor detalle.

Las exigencias que, además, hemos de imponer a la iluminación artificial desde las necesidades de la comodidad visual de los usuarios, no dejan de ser las mismas que las especificadas anteriormente para la natural. Se ha de conseguir un nivel de iluminación suficiente para la actividad que se desarrolla en el local, pero sin provocar efectos incómodos de deslumbramiento.

Pero con la iluminación artificial podemos manipular en origen algunas de las variables que definen la luz, tales como el color, y en consecuencia, hemos de conocer las claves que determinan la eficiencia en su uso, ya que no todos los tipos de color de la luz artificial son convenientes para las diferentes actividades. Dado que normalmente es un conocimiento algo especializado, no se desarrolla aquí. Aunque sí trataremos la cuestión del rendimiento energético, que pasa a ser un aspecto esencial de la iluminación artificial.

A las definiciones básicas dadas al principio del tema se ha de añadir la de flujo luminoso, medido en lúmenes, y su relación con el rendimiento de la potencia consumida. Una vela encendida produce 13 lúmenes, una bombilla incandescente de 100 vatios, 1.200 lúmenes, y un tubo fluorescente de alta potencia de 80 vatios, 4.500 lúmenes.

Este sencillo cuadro, permite contrastar con nuestra experiencia el concepto de lumen comparando una bombilla con una vela, y además constatar el diferente rendimiento energético de las lámparas basadas en la incandescencia y las basadas en la fluorescencia.

Existen diversos procedimientos que permiten establecer la potencia eléctrica a instalar partiendo del nivel de iluminación que deseamos y del rendimiento en lúmenes de las lámparas que utilizemos. En III-2.3 se expone uno de ellos.

Supuesto que hayamos conseguido el nivel necesario, queda por analizar el deslumbramiento. Éste se debe al diseño concreto de la lámpara que nos da luz. Así como la clásica lámpara de mesa ilumina tanto hacia arriba como hacia abajo, pero no directamente a los ojos, las luminarias han de conseguir iluminar el plano de trabajo, pero no los ojos del que trabaja. En general, se consigue haciendo profunda la situación del punto luminoso con relación a los bordes (III-2.3).

En definitiva la planificación de una iluminación artificial ha de tener en cuenta estas consideraciones y que se han de distribuir convenientemente en todos los locales las tomas de corriente eléctrica que van a poder suministrar la energía que se convertirá en energía luminosa (III-4.3).

TEMA 6. Contaminación

HIGIENE Y AMBIENTE ARTIFICIAL

CONTAMINACIÓN DEL AIRE

Agentes contaminantes

Sistemas de ventilación

Ventilación natural

Ventilación mecánica y ventilación híbrida

CONTAMINACIÓN DE LA ENVOLVENTE INTERIOR

Métodos de limpieza

Instalaciones de evacuación

HIGIENE Y AMBIENTE ARTIFICIAL

A lo largo del recorrido efectuado en los tres temas anteriores ya han ido apareciendo variables que además de afectar a la comodidad, también influyen en la salud de los ocupantes del edificio. Si existe un exceso de humedad, las condiciones higiénicas no serán las deseables, al igual que si el calor o el frío son excesivos. Y un exceso de radiación solar puede afectarnos a la vista o a la integridad de nuestra piel. De manera que el tratamiento sobre la salud en realidad se inicia en I-3. Pero si se cumplen las exigencias de comodidad formuladas en estos temas, se aseguran ampliamente las condiciones higiénicas básicas.

Ahora bien, existen factores diferentes de los anteriores derivados de las nuevas condiciones ambientales originadas por la contaminación creada por nuestra propia civilización, que pueden afectar nuestra salud.

Se produce contaminación cuando existe una alteración de las propiedades del medio ambiente por incorporación, por parte del hombre, de perturbaciones materiales o radiaciones.

Sin duda, la civilización actual origina más contaminación que cualquiera de las anteriores, especialmente el exceso de CO₂ producido por la industria, el transporte y los propios edificios. Éstos originan contaminación en tres fases: la de su construcción y fabricación previa de los materiales, su uso, su demolición y desecho. En la actualidad, el uso es la mayor

f fuente de contaminación general. Ya se ha expuesto en I-4 cómo puede el profesional de la arquitectura contribuir a un mayor equilibrio ecológico.

Pero existe contaminación en el propio edificio, gases, radiaciones, polvo, ruido etc., producida por sí mismo, cuyo origen puede encontrarse en los materiales utilizados, en los aparatos del equipo, y sobre la que, además, no tenemos las mismas defensas que contra los excesos de las variables naturales.

Cualquier ser vivo, incluido el ser humano, ha convivido a lo largo de todo el extensísimo período de su evolución biológica, con los factores ambientales naturales, y por propia razón ontológica, ha desarrollado infinidad de mecanismos de defensa frente a sus excesos.

Por contra, los factores que se analizan en I-6 y I-7 se derivan de la existencia de la civilización avanzada que da lugar a los edificios y la ciudad actuales, existencia que desde un punto de vista de la edad biológica, es muy reciente. De hecho, si no se toman todas las precauciones que aquí se exponen, los edificios pueden ser auténticas trampas para la salud de sus ocupantes.

Los edificios deben aportar los sistemas de corrección de estos efectos no buscados, contra los cuales, además, el ser humano no dispone de más recursos propios que los que ya tenía cuando pasó de vivir en la naturaleza a los recintos cerrados.

Es significativa, desde este punto de vista, la diferencia entre las defensas frente a la luz

y las defensas frente al ruido. En el mundo natural existe un nivel de iluminación que puede llegar a dejarnos ciegos, la vista directa del sol. Contra esta posible agresión del medio, todos los seres vivos han desarrollado mecanismos instantáneos de defensa, como los párpados.

Con relación a la audición existen dos diferencias significativas. En primer lugar, en el medio natural no sólo no existe ningún ruido con una intensidad suficiente como para romper los tímpanos (a no ser que nos caiga un rayo en nuestra cabeza, en cuyo caso el problema no es el ruido, evidentemente), sino que ni siquiera se dan ruidos persistentemente inquietantes.

En segundo lugar, la audición constituye un mecanismo básico de defensa contra agresiones de otros seres vivos, sobre todo en la oscuridad, y se basa en una extraordinaria y permanente sensibilidad a cualquier ruido.

La conjunción de las dos cuestiones lleva a que el sistema auditivo carece por completo de defensas frente a la agresividad del medio sonoro generado por las nuevas condiciones ambientales especialmente urbanas e industriales, con ruidos que pueden llegar desde romper el tímpano hasta mermar nuestras capacidades psíquicas por su persistencia. Las orejas no se pueden doblar como los párpados.

Está probado que un ambiente ruidoso como el que se da en una vivienda frente a una calle con tráfico, reduce como mínimo la capacidad de concentración, y puede llegar a producir dolor de cabeza, fatiga y estrés.

Pero no es el ruido la única causa de la nueva agresividad ambiental. De hecho, desde hace pocos años se utiliza un expresión bien significativa, el síndrome del edificio enfermo. Obviamente, el enfermo no es el edificio, sino sus ocupantes. Se considera que puede aplicarse esta denominación cuando éstos manifiestan en una proporción mayor de lo que es razonable esperar (> 20 %), quejas con relación a su salud, con síntomas como mareos, náuseas, irritación en ojos, etc.

Los ya muy extensos estudios realizados concluyen que son edificios que presentan una serie de características comunes:

- buscan reducir los consumos energéticos,
- son herméticos sin ventanas practicables,
- casi siempre tienen un sistema de ventilación forzada y el aire se recircula,

- los paramentos interiores están acabados en gran parte con revestimientos textiles.

Las razones de las afecciones de los usuarios, casi obvias a la vista de las características de los edificios, son causadas principalmente por la contaminación interior producida por la propia actividad de los ocupantes y una ventilación inadecuada. En resumen, la mala calidad del aire es la causa.

Si bien, en general, las viviendas no suelen estar afectadas por estos síndromes, como ya se ha comentado en el tema anterior, sí necesitan tener resuelta la renovación de su aire interior para evitar caer en las condiciones adversas similares a las anteriores.

Pero como todos los usuarios conocen desde hace ya centenares de años, en todos los tipos de edificios, sean cuales fueren las actividades que se desarrollan en ellos, existen otras causas de posible contaminación ambiental debidas a todo tipo de residuos sólidos, desde defecaciones, hasta polvo, suciedad, etc., que es preciso retirar y evacuar al exterior si no queremos ver afectada seriamente nuestra salud.

En definitiva, la higiene deberá contemplar como posibles agentes desestabilizadores todas las variables que determinan el ambiente y añadir la contaminación gaseosa, líquida o sólida que producimos nosotros mismos con nuestras actividades. Los procedimientos para contrarrestar el ruido se analizan en el tema siguiente. Nuestra propia contaminación la dividiremos entre la que afecta directamente al aire y la que genera residuos no gaseosos.

Todas estas exigencias están reguladas en España por el CTE-HS (Habitabilidad Salubridad), que se desarrolla en cinco secciones:

- HS 1, Protección frente a la humedad, a la que se dedica en este texto los temas I-3, y III-6, III-7.1.1, III-8, III-9.1 y III-9.2.
- HS 2 Recogida y evacuación de residuos, que se comenta en el presente tema y en III-2.4.2.
- HS 3 Calidad del aire interior, ya vista en I-3 en relación con la ventilación natural, que se amplía y desarrolla en III-2.4.1.
- HS 4 Suministro de agua, que se desarrolla en III-4.1.
- HS 5 Evacuación de aguas, también comentada en I-3 y en III-2.1 y III-2.4.2.

CONTAMINACIÓN DEL AIRE

Agentes contaminantes

Se puede considerar como una propiedad significativa de los edificios su capacidad para captar, encerrar y mantener durante un tiempo una cierta cantidad de aire exterior. Precisamente, la comodidad térmica en invierno reside en ella, al igual que la del verano con instalaciones de refrigeración. Y es una propiedad que diferencia claramente el ambiente artificial del natural. En éste, el viento cambia de lugar las masas de aire y diluye totalmente los posibles contaminantes. Por contra, el edificio los capta, los encierra y los mantiene en el interior. Pero no sólo eso, sino que el mismo edificio los produce. Es imprescindible analizar esos posibles contaminantes y sus orígenes.

Podemos agruparlos según sea su estado físico, en gases, partículas y radiaciones.

Entre los primeros se han de considerar:

- productos metabólicos, tales como vapor de agua, dióxido de carbono, olor corporal, olores procedentes de instalaciones de saneamiento en mal estado, etc.,
- productos de combustión, como, además de los dos primeros anteriores, el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, etc.,
- gases procedentes de fugas de instalaciones defectuosas o mal utilizadas,
- los compuestos orgánicos volátiles, tales como el formaldehído, los disolventes, etc., y en último lugar y destacado,
- el humo de tabaco.

Entre los segundos:

- partículas no viables tales como las fibras,
- partículas suspendidas respirables y no respirables, y,
- partículas viables, incluidos microorganismos, tales como insectos pequeños, protozoos, hongos, bacterias y virus.

Entre las terceras:

- radiaciones gamma que emiten el radón y las sustancias radiactivas,
- emisiones procedentes de equipos eléctricos o electrónicos, ozono, etc.

Es de destacar que sólo uno de estos subgrupos, las denominadas partículas viables, es

decir, seres vivos minúsculos, se encuentran en el estado natural, todos los demás son debidos a las nuevas condiciones artificiales. Todos pueden producir efectos no deseados que abarcan desde la incomodidad hasta efectos claramente adversos sobre la salud.

El análisis de sus causas nos pueden aclarar cual es el tipo de acción preventiva. Proviene sólo de dos fuentes contaminantes:

- nuestras propias actividades, y,
- del propio edificio, sus materiales y sus instalaciones, incluidos los aparatos de combustión, el mobiliario y los objetos de decoración y el terreno bajo él.

De las actividades habrá que distinguir aquellas que son más contaminantes de las que no, y actuar en consecuencia.

Se pueden proponer dos medios para evitar los efectos negativos:

- el control de las fuentes de contaminación y,

- la actuación sobre el propio aire.

Entre las primeras:

- la utilización de soluciones constructivas y materiales con el mínimo de fuentes contaminantes,
- el correcto diseño y mantenimiento de las instalaciones y
- la colocación de barreras adecuadas que minimicen las radiaciones que no podemos eliminar.

El usuario deberá incluir el uso de fungicidas o biocidas y, naturalmente, una intensa actividad de limpieza.

La actuación sobre el aire se concreta básicamente en su renovación mediante la ventilación mecánica o natural.

Sistemas de ventilación

Ventilación natural

La ventilación natural, según el HS 3, es aquella en la que la renovación del aire se produce exclusivamente por la acción del viento o por la existencia de un gradiente de temperaturas entre el punto de entrada y el de salida.

La ventilación natural a través de la envolvente queda desarrollada en I-4, donde se ex-

ponen, como medios para suavizar los rigores del verano, los dos métodos principales de ventilación natural, la cruzada y la producida por el efecto chimenea, útiles también en invierno a los efectos de renovación del aire. En este caso, ha de considerarse el gasto energético que supone y la necesidad de cierta inercia térmica interior que suavice el cambio de temperatura del aire que comporta la ventilación. Pero, en una situación urbana, todo ello entra en conflicto con la comodidad acústica. En I-7 se exponen algunos procedimientos para superarlo.

La realidad es que en muy pocas ocasiones es posible que la ventilación natural por sí sola solucione siempre todos los problemas, por ello, el CB HS 3 obliga a que los edificios dispongan siempre, también, de ventilación mecánica.

Ventilación mecánica y ventilación híbrida

La ventilación mecánica produce la renovación del aire por medio de aparatos electromecánicos y conductos para el movimiento del aire. Ahora bien, esos mismos conductos, diseñados especialmente para ello y en condiciones climáticas favorables, pueden producir un tiro natural que sea suficiente para aportar, de manera natural, la ventilación necesaria. A ese tipo de instalación de conductos que permite los dos tipos de ventilación se le denomina ventilación híbrida.

En general, y en función del lugar, los conductos para la híbrida son mayores que para la mecánica. El inconveniente de esta última es que supone un gasto de electricidad constante, mientras que la híbrida sólo lo requiere cuando el tiempo meteorológico no es favorable.

En III-2.4.1 se entra en el detalle del cumplimiento de la exigencia según los criterios del CTE-HS-3.

Por otro lado, las instalaciones de extracción de gases y grasas producidos en la preparación de los alimentos tienen cada vez mayor importancia en las viviendas. Los cambios de costumbres en la organización familiar lleva, entre otras muchas cosas, a que un local de la casa marginado antaño, la cocina, esté adqui-

riendo una situación preponderante como centro de reunión distendida, en el que se hacen tertulias y se ve la televisión. Pero este nuevo uso de un local tan antiguo es imposible si no está resuelta completamente la extracción de humos y grasas, lo que requiere unas campañas eficaces, unos conductos de sección holgada y unos extractores de potencia adecuada (III-2.4.1).

CONTAMINACIÓN DE LA ENVOLVENTE INTERIOR

Métodos de limpieza

De todo lo dicho se desprende la importancia de evacuar todos aquellos productos de nuestra propia actividad que puedan llegar a actuar como contaminantes de nuestro aire y que no se contienen en él sino sobre los pavimentos, los muebles, etc. Sin duda es una práctica sobre la que no hace falta insistir.

Pero conviene que los que piensan los edificios no olviden que una de las cualidades de todos sus materiales ha de ser su capacidad de ser fácilmente limpiables. Esto atañe de una forma directa al elemento que con mayor facilidad recoge la suciedad, el pavimento. La limpieza del pavimento pasa a ser una operación clave en el comportamiento higiénico del edificio. Cuando se analizan las variables que condicionan la elección y el diseño de los pavimentos se ha de incluir el análisis de la actividad a desarrollar sobre él y las posibilidades reales de los procedimientos de limpieza (II-9.1).

Instalaciones de evacuación

Adquieren gran importancia en todo este panorama las instalaciones de suministro de agua (III-4.1) como principal agente limpiador y todas aquellas instalaciones que facilitan la evacuación de todos aquellos residuos tanto sólidos como líquidos que nuestra actividad produce. Se desarrollan en III-2.4.2.

TEMA 7. Ruido

VARIABLES DE LA COMODIDAD AUDITIVA MÍNIMA

- Subjetividad de la percepción sonora
- Nivel de intensidad bajo como exigencia mínima

DEFINICIONES BÁSICAS

PROPAGACIÓN DEL RUIDO A TRAVÉS DEL ESPACIO ARQUITECTÓNICO

- Coefficiente de absorción
- Tiempo de reverberación
- Reducción del nivel de intensidad por absorción

TRANSMISIÓN DEL RUIDO A TRAVÉS DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

- Paredes simples
- Paredes y forjados conjuntamente
- Paredes dobles
- Transmisión del ruido de impacto
- Materiales absorbentes y dispositivos aislantes

COMODIDAD ACÚSTICA MÍNIMA

- Valores de los aislamientos mínimos
- Influencia de la compartimentación
- Influencia de la envolvente

VARIABLES DE LA COMODIDAD AUDITIVA MÍNIMA

Los sentidos de la vista y del oído son los que nos permiten captar la mayor parte de la información que nos viene del mundo, y los que nos transmiten la totalidad de las emociones producidas por el arte. Ya se ha hecho mención en I-5 a la importancia que tiene la vista en la percepción de la arquitectura, y no es necesario insistir en ello.

Tampoco parece necesario insistir en la importancia capital que tiene también la audición, no sólo para recibir información (incluso del espacio arquitectónico en el que estamos), sino para captar una de las emociones más abstractas y a la vez profunda, sólo percible a través del oído, es decir, la música.

En una sublime conjunción para los sentidos, la arquitectura puede aportar toda su potencia en la intensificación de estas emociones a través de edificios especializados como auditorios o teatros de la ópera.

Pero no es esta la razón por la cual se justifica este tema. La razón es mucho más primitiva, mucho más primaria. Pero ineludible.

Como ya se ha anunciado en las introducciones anteriores, su objetivo es dar las pautas mediante las que los elementos constructivos y la arquitectura pueden contribuir a reducir lo que justificadamente podemos denominar contaminación acústica producida por nuestra civilización industrial y urbana. Sólo si eliminamos esta contaminación conseguiremos lo que aquí se denomina comodidad acústica mínima y sólo así podremos, si lo deseamos, disfrutar de la enorme capacidad informativa y emotiva de nuestro sentido de la audición.

Subjetividad de la percepción sonora

Es muy complejo definir los valores que han de tener las variables que definen la percepción sonora para que podamos afirmar que hemos

conseguido la comodidad acústica mínima. Inciden cuestiones de muy diverso signo que pueden agruparse en tres tipos básicos.

1) La cultura colectiva. Por ejemplo, las opiniones al respecto de los catalanes son muy diferentes de las de los andaluces, y las de todos ellos muy diferentes de las de los suizos o alemanes, para los que el silencio es un bien máspreciado que para nosotros.

2) La actividad individual que se está desarrollando. No es lo mismo amar que dormir, comer que estudiar. La idea de privacidad, evidente y fácil de resolver con relación a la vista, se complica notablemente con relación a la audición, ya que muchas veces no nos sentimos cómodos, no sólo si oímos algún ruido, sino si sospechamos que alguien puede escuchar los nuestros propios.

3) El tipo de ruido, continuo o discontinuo, con información o sin ella.

Puede llegar a ser mucho más enervante el goteo espaciado de un grifo mal cerrado que las mismas cataratas del Niágara.

Tampoco es lo mismo el ruido de una máquina que el del equipo de música del vecino. Normalmente, el ruido con información del vecino es el más enervante. Es un fenómeno conocido que cuando llega la primavera se producen conflictos vecinales, que llegan a veces a las páginas de sucesos de los periódicos, debido a que las condiciones acústicas del invierno varían radicalmente por la aplicación de los procedimientos de la comodidad de verano explicados en I-4, como abrir ventanas o retirar las alfombras.

Nivel de intensidad bajo como exigencia mínima

La respuesta que da la arquitectura a toda esta complejidad es conceptualmente simple. Se ha de conseguir que todos estos ruidos nos lleguen con el nivel de intensidad global lo más bajo posible. Es decir, que entre el mínimo ruido de tráfico de la calle, que casi no oigamos al vecino, etc. Pero si bien es simple conceptualmente, conseguirlo es de una enorme dificultad constructiva.

El papel que han de desempeñar los elementos constructivos es, sencillamente, reducir

los niveles de ruido producidos por todas esas fuentes sonoras. Pero ese objetivo entraña muchas dificultades de diferente entidad. En primer lugar, cuantificar objetivamente tanto los ruidos originales como los niveles a los que hay que reducirlos, y cuantificar cómo podemos rentabilizar el comportamiento de los elementos constructivos en ese sentido. Y en segundo lugar, dada la extraordinaria sensibilidad de nuestro oído y si tenemos una cierta cultura del silencio, la materialización de los elementos constructivos necesarios es notablemente cara.

El CTE-HR fija las exigencias que afectan a los elementos constructivos.

Para que se puedan exponer las claves de todo ello, y contrariamente a lo que ocurre con las otras variables del ambiente más intuitivas, es imprescindible dedicar cierto espacio de este texto a dejar claras previamente unas cuantas definiciones básicas. Una vez vistas, se sigue con los mecanismos mediante los que se desplaza y se puede interceptar el ruido, para finalizar con una corta visión de la influencia que, en su interrupción, pueden tener los elementos constructivos, que hay que ampliar en los tomos II y III.

DEFINICIONES BÁSICAS

Sonido y ruido

El sonido es un movimiento vibratorio del aire compuesto por pequeñísimas variaciones instantáneas de presión atmosférica, en forma de ondas de compresión y depresión, y que se propaga a una velocidad del orden de 340 m/s.

Cuando se produce un sonido, la presión del aire que rodea al oído fluctúa un cierto número de veces por segundo alrededor de la presión atmosférica, produciendo en dicho órgano una sensación auditiva.

Un sonido se podrá caracterizar, en consecuencia, por dos parámetros básicos: la magnitud de la variación de presión, o presión acústica que da lugar a su intensidad, y el número de veces por segundo que se produce dicha variación de presión, o frecuencia o tono.

Los sonidos habituales no son de una sola frecuencia e intensidad, sino una mezcla y adición de infinidad de sonidos con intensidades y frecuencias diferentes.

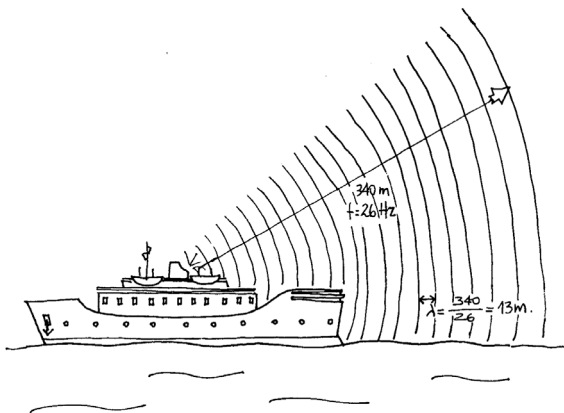
Si en los sonidos que se mezclan existe uno con intensidad dominante, caso de la nota emitida por un instrumento musical, al conjunto de ellos se le sigue llamando sonido. Si el conjunto está compuesto por la mezcla desordenada de sonidos de todas las frecuencias, se acostumbra llamar ruido. Aunque entrando en el terreno subjetivo se puede decir que cualquier sonido molesto también es un ruido.

Frecuencia

Su unidad de medida es el hercio (Hz) y corresponde a una vibración o ciclo cada segundo (también c/s).

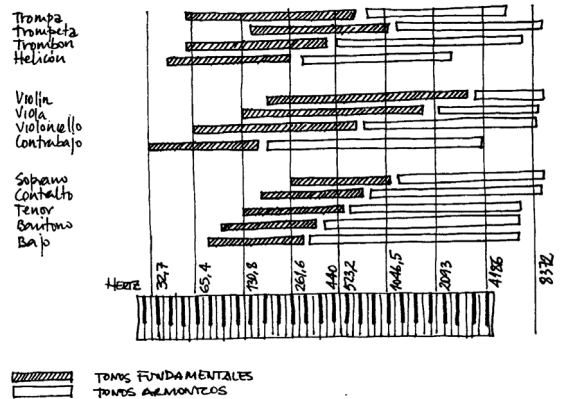
El oído humano puede llegar a percibir sonidos con frecuencias comprendidas entre 20 Hz y 20.000 Hz.

Dado que el ruido se propaga con una velocidad de 340 m/s, en esta cantidad de me-



tros habrá el número de compresiones que indique el valor de la frecuencia. La longitud de onda, o distancia entre dos compresiones, es el cociente de 340 m entre el número de la frecuencia. Un sonido de 400 Hz, tiene una longitud de onda de 0,85 m, uno de 26 Hz, 13 m.

La relación entre la frecuencia en Hz de un sonido y la experiencia auditiva propia puede establecerse por medio del cuadro adjunto.



Cualquier sonido o ruido está compuesto por la suma de varios sonidos de diferentes frecuencias. Los sonidos correspondientes a la nota La de la octava central (440 Hz) emitidos por un clarinete y por una trompeta por ejemplo, tienen ambos una componente de gran intensidad para esa frecuencia, pero aparecen componentes de frecuencias diferentes, los armónicos, que siendo diferentes para cada uno de los instrumentos los hace identificables. La composición relativa de las frecuencias e intensidades, diferente para cada instrumento, personas, etc., da el timbre del sonido, que se puede estudiar mediante su espectro, como se explica más adelante.

Respecto a los sonidos producidos por el habla, es interesante comentar que los armónicos correspondientes a las consonantes son bastante ricos en frecuencias agudas (la "s" puede llegar a 8.000 Hz). De las vocales, la "u" es la que contiene mayor intensidad de graves.

Las frecuencias de los sonidos que se estudian en la acústica de la construcción están comprendidas entre 100 Hz y 4.000 Hz.

Intensidad

Las variaciones de presión atmosférica que origina una onda acústica se pueden medir en pascals ($\text{Pa} = \text{N/m}^2$).

Sin mayores profundizaciones se puede decir, con el fin de dar una idea de magnitud, que la presión atmosférica (760 mm) medida en pascals es de 100.000 Pa y que el oído humano puede percibir variaciones de presión de

hasta 0,00002 Pa, lo que da idea de su extrema sensibilidad. Por el otro extremo es capaz de resistir como máximo una variación instantánea de presión de 20 Pa.

Estas vibraciones comportan un transporte de energía mecánica, lo que hace que un ruido pueda poner en vibración una pared y ésta a su vez el aire del otro lado.

A la energía transmitida por la onda sonora en unidad de tiempo, a través de la unidad de superficie, se le denomina intensidad. Su unidad es el watio/m².

Esta energía es función de la magnitud de la variación de la presión. A los valores extremos de la presión audibles por el oído, 0,00002 Pa y 20 Pa, les corresponden unas intensidades de 10⁻¹² W/m² y 1 W/m². (La relación es $I_1/I_2 = P_1^2/P_2^2$).

Nivel de intensidad

El gran margen numérico de las intensidades audibles por el oído humano, de 10⁻¹² W/m² a 1 W/m², y el hecho de que el organismo humano tenga aproximadamente una respuesta logarítmica a los estímulos, llevan a introducir en la medición de las intensidades, una escala logarítmica decimal, con punto de referencia en la intensidad correspondiente al umbral de audición (10⁻¹² W/m²), dando lugar al nivel de intensidad L. A un ruido de intensidad I, le corresponde un nivel de intensidad:

$$L = 10 \log (I/10^{-12})$$

La unidad de medida de esta escala es el decibelio (dB).

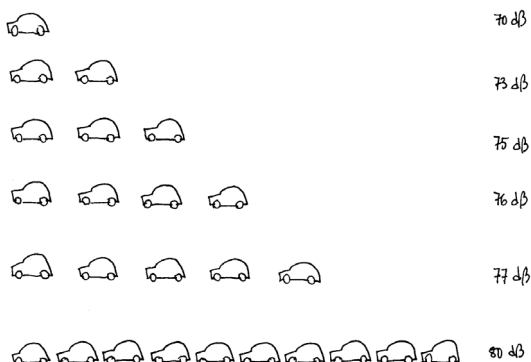
A los valores extremos de intensidad audible, 10⁻¹² W/m² y 1 W/m², les corresponden 0 dB y 120 dB.

Esta notación logarítmica, si bien permite pasar de una escala de medida muy extensa a otra más reducida, también presenta algún inconveniente en su manejo. Por ejemplo, el nivel resultante de varios ruidos simultáneos no es la suma de sus niveles, cosa que sí ocurre con sus intensidades en W/m².

De una forma general, la suma de los niveles L1, L2,..., viene dado por la expresión:

$$L = 10 \log (10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots) \text{ dB.}$$

La utilización de la escala logarítmica y con ello la dificultad en el cálculo, se debe al hecho de intentar reproducir con bastante aproximación la respuesta del oído frente a los fenómenos sonoros. Para el oído humano, la presencia de dos ruidos iguales no origina el doble de ruido, sino uno ligeramente superior al que se percibe cuando hay uno sólo, y la mezcla de dos ruidos con niveles bastante diferentes no origina un nivel mayor del que produce el de mayor nivel.



Espectro de un ruido

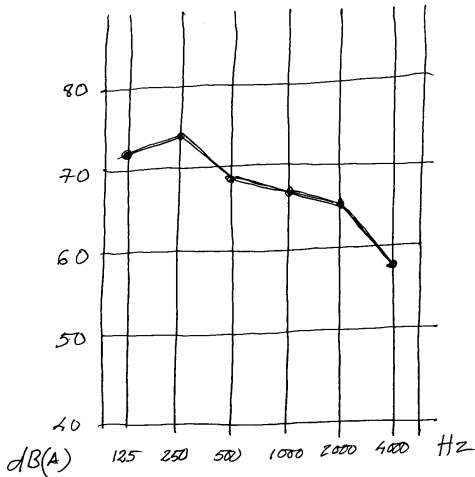
Los niveles de intensidad de un ruido son diferentes para cada una de las frecuencias analizadas por separado. El gráfico que relaciona los diferentes niveles y las frecuencias se denomina espectro del ruido. Por ejemplo, el ruido de tráfico rodado intenso de una calle da un espectro genérico en el que se advierte que los niveles de intensidad de las frecuencias graves son mayores que los de las agudas.

En un tratamiento acústico riguroso, de aislamiento o de acondicionamiento, es básico conocer los espectros de los ruidos a considerar. Si de aislamiento se trata, no es lo mismo aislar un ruido de tráfico, intenso para frecuencias graves, que aislar los ruidos producidos por un taller de carpintería con componentes agudas muy intensas.

Una voz masculina al hablar emitirá sonidos con intensidades mayores para las frecuencias comprendidas entre 100 y 400 Hz y armónicos que llegarán hasta 6.000 Hz, que definen los sonidos correspondientes a conso-

antes y vocales. Si por alguna causa se suprimen o disminuyen notablemente todas las frecuencias superiores a 2.000 Hz, las consonantes dejan de ser inteligibles. Si se suprimen las frecuencias superiores a 500 Hz, todas las vocales se confunden con una u. Por esta razón, resultan difíciles de entender las conversaciones oídas a través de una pared. El aislamiento que proporciona un muro es siempre mayor para las frecuencias que diferencian entre sí las consonantes e incluso las vocales.

La variable continua de las frecuencias se divide generalmente en intervalos de octavas (frecuencias dobles, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1.000 Hz, 2.000 Hz, 4.000 Hz...), agrupando alrededor de cada valor la suma de los niveles de intensidad de las frecuencias comprendidas



en su intervalo. Los intervalos también pueden ser de tercio de octava, en este caso, al ser menor el intervalo, los niveles de intensidades serán menores. El análisis espectral por octavas se utiliza normalmente en las mediciones in situ, y el de tercios de octava en las efectuadas en laboratorios. La suma (logarítmica) de todos los niveles de intensidad da el nivel global de intensidad.

Nivel de intensidad ponderado

El oído humano no tiene la misma sensibilidad para todas las frecuencias. Un sonido puro de 100 Hz con un nivel de intensidad de 60 dB lo

percibe igual que uno de 1.000 Hz y 50 dB. El oído es más sensible a las frecuencias medias.

Para adaptar la medición física a esta característica fisiológica se han establecido diversos sistemas, de los cuales la curva de ponderación A, incorporada en todos los sonómetros, es la más aceptada internacionalmente. A las mediciones efectuadas siguiendo esta corrección se les denomina dBA, y tiene ya en cuenta la menor sensibilidad del oído a las frecuencias graves. La menor sensibilidad del oído humano a las frecuencias graves es beneficiosa, teniendo en cuenta que son las más difíciles de aislar y absorber.

La relación entre los niveles de intensidad global en dBA, y la experiencia auditiva propia, puede establecerse mediante el cuadro adjunto.

Para cada nivel de ruido medido en dB se indican:

- los efectos o impresiones auditivas
 - fuentes ruidosas cotidianas conocidas
 - distancia en metros a la que deja de ser inteligible la palabra con un ruido de fondo de ese nivel con voz normal o voz fuerte.
- 120
 - peligroso, la exposición a este nivel debe ser lo menor posible
 - reactor en despegue a 100 m
 - conjunto musical amplificado (108-114 dBA)
 - conversación imposible
- 110
 - tiempo de exposición limitado a 2 h/día como máximo
 - martillo neumático a 1 m (104 dBA),
 - reactores en vuelo a 300 m (103 dBA)
 - conversación imposible
- 100
 - riesgos auditivos si la exposición es superior a 8 h/día
 - moto a escape libre, claxon de automóvil, interior de vagón de metro
 - conversación imposible

90		• muy ruidoso, inicio de daños auditivas para una exposición superior a 8 h/día • tren de viajeros a 25 m, calle de tráfico pesado, grito a 3 m • conversación posible sólo gritando cerca del oído
80		• ambiente ruidoso • automóvil a 100 km/h a 7 m, autobús a 7 m, • oficina muy ruidosa, aparato de televisión, • conversación a 0,12, o a 0,25
70		• ambiente animado • calle con tráfico ligero, automóvil a 3 m, restaurante muy concurrido, aspirador ruidoso • conversación a 0,4, o a 0,8
60		• calle tranquila • oficina o restaurante tranquilo, aparato de radio a volumen normal, • conversación a 1,2, o a 2,5
50		• parque urbano tranquilo, interior de viviendas • conversación a 3,9, o 7,8
40		• calma admisible para el sueño • nivel diurno en el campo (35 dBA), ruido de fondo de un barrio muy tranquilo, música suave, conversación apacible, interior de biblioteca
30		• silencioso, ruido de insecto (28 dBA)
20		• silencio perfecto, bosque bajo la nieve, desierto, estudio de grabación muy aislado (18 dBA)

Tipos de ruido según su origen

El ruido aéreo está producido por una fuente sonora que no está rigidamente ligada a ningún elemento sólido del edificio. Son estrictamente aéreos los ruidos producidos por un avión en vuelo, la voz humana o una trompeta.

No así el producido por un piano apoyado directamente sobre un forjado. En este caso, además del ruido aéreo, el instrumento transmite directamente al forjado parte de las vibraciones que produce. Esta transmisión directa aporta más energía que la aportada a través del aire, y se propagará con mayor facilidad a los locales vecinos, convirtiéndose finalmente en ruido aéreo.

Este ejemplo nos lleva a considerar el segundo tipo de ruido, denominado generalmente ruido estructural, cuya fuente está siempre ligada, en mayor o menor medida, a un elemento constructivo. Como ejemplos se pueden citar los producidos por instalaciones empotradas o por las pisadas de un usuario al andar sobre el piso. El tráfico rodado, además de ruido aéreo, también puede producir vibraciones que se transmiten a través de las cimentaciones y los elementos estructurales. La intensidad de estos efectos depende de la distancia entre el edificio y la calzada.

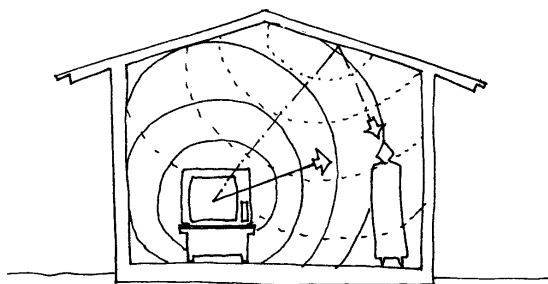
La anterior distinción entre ruido aéreo y estructural es básica, ya que los métodos de aislamiento del primero no son válidos para el segundo, aunque sí en parte es válida la viceversa. Contra la transmisión del ruido estructural son precisos cortes elásticos del sólido conductor, por ejemplo, losas flotantes sobre los forjados, que si forman doble panel también suponen un incremento de aislamiento del ruido aéreo. Mientras que contra éste se pueden utilizar elementos pesados que detienen su transmisión, método no útil para el estructural.

PROPAGACIÓN DEL RUIDO A TRAVÉS DEL ESPACIO ARQUITECTÓNICO

El modo de propagarse el ruido aéreo a través de aire ya se ha expuesto en las definiciones anteriores. Ahora es preciso analizar lo que ocurre cuando ese ruido se produce en un espacio arquitectónico delimitado por paredes, suelos y

techos. Parte de la energía mecánica se refleja sobre las superficies y vuelve al espacio de donde proviene. La otra parte provoca la vibración de la pared o entrepiso que, a su vez, produce una vibración del aire de la cara opuesta, lo que es equivalente a la transmisión a su través. Pero en realidad el sonido no los atraviesa, sino que es la vibración de la pared la que origina el sonido en la otra cara. Dejamos este caso para el siguiente apartado.

Las ondas que llegan directamente al oído forman el se denomina campo directo, y las que llegan después de haber rebotado una o



más veces en los paramentos que determinan el espacio, campo reverberado.

El sonido reflejado siempre es de menor intensidad que el incidente, dependiendo de las condiciones materiales y formales de la superficie con la que choca. La parte de energía que no se refleja, se absorbe y se transforma en calor, bien por un proceso de rozamiento, bien por un mecanismo de resonancia.

El primer caso se da en mayor medida en superficies porosas, paneles de corcho, mantas de fibra de vidrio, revestimientos textiles y, en general, en materiales con poros abiertos. Se les denomina materiales absorbentes porosos.

El segundo caso presenta dos variantes: la primera, superficies con pequeños orificios comunicados con una cámara de aire posterior (resonador Hemholtz), caso de las losetas de escayola o bandas metálicas perforadas; la segunda, placas que, sin estar perforadas, forman una unidad elástica con la cámara de aire posterior (resonador de membrana), caso del conjunto formado por el falso techo y su cámara. En la mayoría de los falsos techos se com-

binan dos o tres de los casos anteriormente mencionados. En conjunto se les puede denominar dispositivos absorbentes por resonancia.

Coefficiente de absorción

Las cualidades absorbentes de un material o dispositivo se cuantifican por medio de su coeficiente de absorción, que se expresa con la letra griega alfa α , definido como el cociente entre la energía acústica absorbida y la energía acústica incidente. Su valor oscila consecuentemente entre 0 y 1, desde los materiales más reflectantes o nada absorbentes, a los totalmente absorbentes, siendo, obviamente, una magnitud adimensional.

Pero como ocurre con cualquier magnitud acústica, este valor varía según la frecuencia del sonido incidente, por lo cual debe expresarse mediante gráficas semejantes a las utilizadas para representar el espectro de un ruido.

Por lo general, los materiales porosos absorben mejor las frecuencias agudas, mientras que la absorción de las frecuencias graves aumenta con el espesor del material. Los dispositivos absorbentes por resonancia presentan un máximo de absorción para una frecuencia determinada.

Para determinar la reducción del nivel de intensidad de un ruido y del tiempo de reverberación de un local se utiliza el concepto de superficie de absorción equivalente, definida como el producto entre el coeficiente de absorción del elemento y la superficie real del mismo:

$$A_i = S_i \times \alpha_i$$

Es un valor único que determina la influencia de dicha superficie en el conjunto de todos los paramentos del recinto.

Si un local tiene coeficientes de absorción distintos para cada uno de sus paramentos (paredes, suelos, techos, ventanas), su capacidad total de absorción será la suma de las superficies equivalentes de cada uno de sus paramentos:

$$A = S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 + \dots + S_n \alpha_n = \sum S_i \alpha_i$$

Tiempo de reverberación

Un ruido originado en un local con paredes reflectantes sigue percibiéndose a lo largo de una fracción de tiempo después de producirse. Las sucesivas ondas reflejadas van llegando al oído en función del recorrido que han tenido que efectuar. Es la sensación percibida en el interior de una catedral de muros de piedra. Si las paredes del local se cubren con materiales absorbentes, ese tiempo se reduce considerablemente. A fin de poder cuantificar esta característica del local, se introduce el concepto de tiempo de reverberación.

El tiempo de reverberación de un local es el que transcurre desde que cesa la fuente del ruido hasta que su nivel de intensidad disminuye en 60 dB. Puede calcularse mediante la fórmula de Sabine:

$$T_r = 0,163 V/A$$

siendo V el volumen del local y A la superficie equivalente definida en el apartado anterior.

Aquellos locales en donde la percepción del sonido, música o palabra, es la función principal, deben tener un tiempo de reverberación concreto. La profundización en este aspecto cae fuera del alcance de este texto.

Reducción del nivel de intensidad por absorción

En cualquier punto del espacio arquitectónico, el nivel de intensidad del ruido será la suma logarítmica de los dos niveles de intensidad, debidos uno al campo directo y otro al campo reverberado.

El nivel del campo directo viene dado por la expresión:

$$L_d = L_w - 20 \log d - 11 \text{ (dB); para } d > 0,28 \text{ m}$$

siendo L_w la potencia de la fuente ($L_d = L_w$, si $d = 0,28 \text{ m}$) y d la distancia del punto receptor a la fuente.

El nivel de intensidad del campo directo disminuye al aumentar la distancia (cosa que ya sabíamos por experiencia propia; la mejor manera de no oír un ruido es alejarnos de él).

El nivel del campo reverberado viene expresado, con aproximación suficiente, por la expresión

$$L_r = L_w - 10 \log A + 6 \text{ (dB)}$$

siendo $A = \sum S_i \alpha_i$, ya definido.

Es importante constatar que el nivel del campo reverberado es igual para cualquier punto del local, y aumenta o disminuye en relación directa con la capacidad absorbente de la superficie de los paramentos que lo limitan (α_i). En un punto cualquiera del recinto, el nivel global será:

$$L_g = L_d + L_r$$

En algunos de estos puntos ocurre que $L_d = L_r$, situados a una distancia $d = 0,14 \sqrt{A}$, llamada radio sonoro. En puntos más alejados del foco, el campo reverberado es mayor que el directo; en puntos situados dentro del radio sonoro el campo directo es mayor que el reverberado. Si recordamos que percibimos casi como único el ruido de mayor intensidad, podemos decir que dentro del radio sonoro "sólo se oye" el campo directo, cuyo nivel disminuye al alejarse de la fuente sonora, y que fuera del radio sonoro "sólo se oye" el campo reverberado, que se mantiene constante, independientemente de donde nos situemos.

En consecuencia, si se pretende reducir el nivel de intensidad del ruido en el interior de un recinto, existen dos procedimientos:

- reducir la potencia de la fuente de ruido,
- incrementar la absorción en las superficies de los paramentos interiores, teniendo en cuenta que esta medida sólo será efectiva en aquellos puntos situados a una distancia mayor que el radio sonoro.

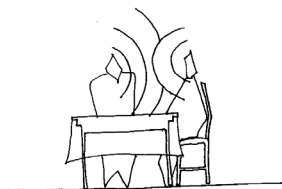
Es un efecto que se puede percibir perfectamente en los locales públicos. Como ejemplo, consideremos un local para restaurante de dimensiones simples, $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, para simplificar. Los materiales utilizados son poco absorbentes, un suelo de terrazo ($\alpha = 0,01$) y paredes y techos enyesados ($\alpha = 0,03$).

La superficie absorbente de todo el local es:

$$A_i = (10 \times 10 \times 0,01) + (10 \times 10 \times 0,03) + 4(10 \times 3 \times 0,03) = 7,6 \text{ m}^2.$$

El radio sonoro será $d = 0,14 \sqrt{7,6} = 0,38$ m.

A una distancia mayor de esta cantidad, oiremos principalmente el campo reverberado producido por las conversaciones de comensales repartidas homogéneamente por toda la sala. Para poder entenderse entre sí dos personas concretas, tendrán que situarse a una distancia menor que la citada, o gritar desaforadamente; si esta situación se repite para todos los comensales, el nivel de intensidad se elevará cada vez más, resultando lo que se entiende por restaurante ruidoso, donde el nivel puede llegar a 80 dBA o más.



Supongamos que el suelo se reviste de moqueta ($\alpha = 0,3$), las paredes se tapizan ($\alpha = 0,18$) y el techo se recubre con un cielo raso de losetas absorbentes ($\alpha = 0,6$). La nueva superficie será:

$$A_2 = (10 \times 10 \times 0,3) + (10 \times 10 \times 0,6) + 4(10 \times 3 \times 0,18) = 112 \text{ m}^2$$

El radio sonoro será en esta situación $d = 0,14 \sqrt{112} = 1,48$ m.

La disminución del nivel de intensidad del campo reverberado será:

$$L_1 - L_2 = 10 \log (A_2/A_1) = 11 \text{ dB}$$

La sonoridad ha disminuido a la mitad. Las conversaciones serán más apacibles ya que

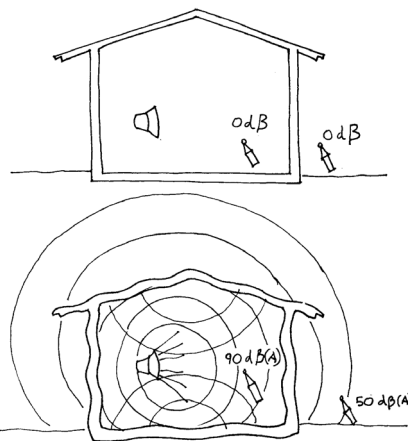
las distancias normales entre comensales siempre son menores que dicho radio, y el campo reverberado no afectará al campo directo. El efecto es doble, menor campo reverberado y disminución del nivel de emisión de los focos ruidosos.

En la práctica este cálculo debe hacerse para cada una de las frecuencias (125 Hz, 250 Hz, etc.) obteniéndose valores para cada uno de ellas, de los cuales serán mayores los de las frecuencias agudas, dado que son absorbidas en mayor grado por los materiales porosos. También debería considerarse la influencia del mobiliario y de los propios usuarios, ya que en definitiva son también elementos de absorción.

TRANSMISIÓN DEL RUIDO A TRAVÉS DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

Paredes simples

Supongamos una habitación cerrada por paredes de ladrillo de 15 cm y un forjado de hormigón. En su interior hay un altavoz y un sonó-



metro, que es el aparato que permite medir las intensidades del sonido en dBA. El altavoz empieza a funcionar y el nivel de intensidad en el espacio interior llega, por ejemplo, a los 90 dBA. Las paredes entran en vibración por efecto de este ruido y emiten ruidos que se pueden oír en el exterior. Medimos esos ruidos con otro sonómetro y podemos suponer que

tienen una intensidad de 50 dB. La pared ha reducido el ruido en una cantidad de $R = 90 - 50 = 40$ dBA. Si la pared hubiera sido de papel, el ruido exterior hubiese sido mucho más alto, es decir, el aislamiento habría sido menor. Si hubiera sido plomo, el aislamiento habría sido mayor y menor el ruido.

La teoría, la experimentación y nuestra propia percepción nos dicen que una pared simple transmite menos el ruido cuanto más pesada es. Este fenómeno queda reflejado en la expresión popular que se refiere a “paredes de papel” como símbolo de la excesiva ligereza de la construcción moderna, y, consecuentemente, su poca capacidad de aislar frente a los ruidos producidos por el vecino. Esta relación entre el valor R que un cerramiento puede reducir el ruido y su masa superficial, se denomina ley de masas. Si se utilizan los decibelios para su expresión, no es una relación directa sino logarítmica, tal como se ve líneas más abajo.

Menos evidente es el fenómeno por el que una pared simple transmite peor los ruidos de frecuencias agudas que los de frecuencias graves. Sin embargo, este fenómeno es fácilmente comprobable. Una conversación oída a través de una pared suele ser ininteligible, precisamente porque esta pared no transmite los sonidos de frecuencias más agudas que permiten distinguir entre sí las consonantes y gran parte de las vocales; de este modo se confunden unos sonidos con otros impidiendo la intelección de las palabras.

La relación que existe entre la capacidad de reducir la intensidad de un sonido de una pared y la frecuencia de los ruidos, se articula en la ley de frecuencias y también es logarítmica.

Es preciso destacar que, al igual que la superficie del mar está sometida a muy diferentes tipos de olas de diversos tamaños y frecuencias simultáneamente, una pared entra en vibración según todas las frecuencias que llegan sobre ella al mismo tiempo.

La fórmula teórica que relaciona las dos leyes es:

$$R = 20 \log m + 20 \log f - 48 \text{ dB}$$

siendo, m, la masa superficial (kg/m^2) de la pared, y f la frecuencia (Hz) del sonido incidente.

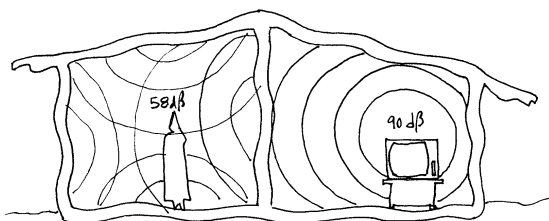
Más que la aplicación práctica de la expresión, interesa destacar varias conclusiones importantes que se deducen de su lectura:

- la capacidad de reducir el ruido, R, también denominada aislamiento específico de una pared simple, sólo depende de su masa;
- al doblar la masa de una pared no se dobla su R, sino que éste aumenta como máximo en 6 dB;
- una pared simple aísla mejor los ruidos de frecuencia aguda que los de frecuencia grave.

La práctica habitual de la construcción no tiene en cuenta las frecuencias y utiliza un valor simplificado de R. Una aproximación a la R de una pared de una hoja, si su masa es $< 150 \text{ kg/m}^2$, puede obtenerse con la expresión $R = 16,6 \log m + 5 \text{ dBA}$. Si la masa es $> 150/\text{m}^2$, $R = 36,5 \log m - 38,5 \text{ dBA}$. Si se desea conocer con mayor precisión, deben utilizarse datos obtenidos en laboratorios. En éstos se averigua la R de una pared simple o compuesta sin la influencia de las transmisiones de otros elementos constructivos laterales, lo cual ocurre siempre en los edificios, tal como se ve a continuación.

Paredes y forjados conjuntamente

En el caso de dos habitaciones contiguas, el ruido pone en vibración los forjados y paredes o fachadas laterales que también transmiten el ruido al vecino; son las denominadas transmisiones indirectas o laterales, que pueden aumentar de 2 a 10 dBA el ruido que pasa de una sala a otra.

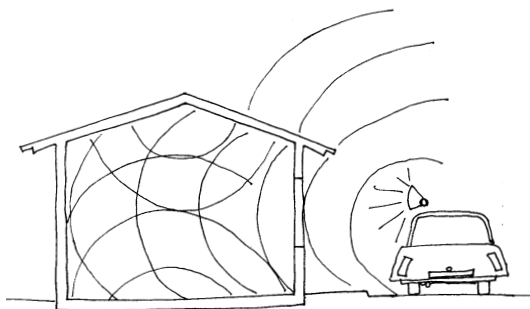


La capacidad aislante de paredes y forjados juntos en un edificio siempre es bastante menor que la que cada uno en el laboratorio. Por ello, para saber cuánto aíslan de verdad, se han de hacer ensayos en los mismos edificios. La letra con la que se indica el resultado de ese

aislamiento conjunto en el edificio no es la R , sino la D .

Si la pared P es la misma del caso anterior, un ruido de 90 dB se oír en la sala vecina con una intensidad de 58 dB, ya que los forjados y paredes laterales aumentan la transmisión en unos 8 dB. Es decir, la pared sola tiene una $R = 40$ dBA, pero la realidad es que el conjunto de paredes y forjados aportan un aislamiento de $D = 32$ dBA.

Si el caso es el de una fachada que da a una calle con mucho tráfico, el ruido entrará por las rendijas de las ventanas si no cierran bien. Si las juntas son estancas, su aislamiento depende del espesor del vidrio, que aunque sea significativo siempre resultará más ligero que la parte maciza, por lo que el ruido del exterior siempre entra por la ventana.



En los dos casos, el ruido que atraviese las paredes y la ventana, una vez dentro de la habitación y si las superficies son duras, se verá aumentado por la reverberación. Puede evitarse recubriendo las paredes de materiales absorbentes, que no aumentarán el aislamiento, sino la absorción del ruido que ya ha entrado.

Paredes dobles

La reducción del ruido transmitido por medio de paredes simples, está supeditada a la ley de masas, lo que implica que para obtener reducciones importantes deben utilizarse elementos constructivos muy pesados.

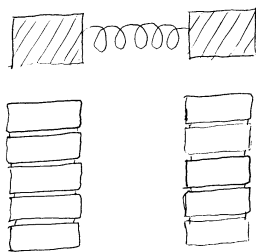
Por este motivo, se ha desarrollado notablemente la técnica de construcción de paredes dobles, que con menor peso ofrecen mayor reducción.

En esencia, una pared doble consta de dos paredes simples separadas por un medio elástico, que habitualmente es el propio aire, o un material de relleno de características físicas adecuadas.

El máximo rendimiento se consigue con el menor número de uniones rígidas entre las dos paredes, y si la separación es total, mejor.

Mediante este dispositivo se pueden conseguir aislamientos específicos R , mayores que los que se obtendrían al reunir la masa de las dos paredes de una sola hoja. La clave de su funcionamiento es la frecuencia de resonancia.

Las dos paredes y el medio elástico entre ambas constituyen un sistema mecánico, que se comporta frente al ruido como un sistema formado por dos masas unidas por un muelle. El sistema así formado tiene una frecuencia propia de vibración.

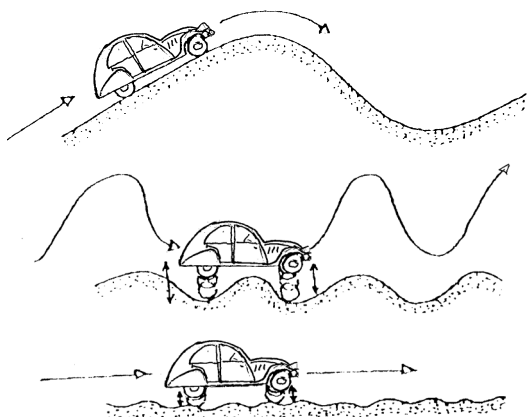


Frente a ruidos incidentes con distintas frecuencias ocurre:

- para los ruidos con frecuencias menores que la propia del sistema formado por la pared doble o frecuencia de resonancia, ésta se comporta como una pared simple;
- para los ruidos con frecuencias iguales a las de resonancia de la pared doble, ésta aísla menos que una pared simple de igual masa;
- para los ruidos de frecuencias superiores, el aislamiento de la pared doble es superior al que le correspondería por la ley de masas.

El fenómeno es equivalente al que se produce cuando un coche circula por una carretera (especialmente si es un modelo entrañable ya en desuso). Las ondulaciones de ésta, que pueden ser amplias, medias y pequeñas (con frecuencias, graves, medias y agudas), son las de la primera pared. Los amortiguadores del coche actúan como un muelle que tiene que evitar que alcancen a la cabina o (segunda pared), las vibraciones de la carretera (primera

pared). Si la ondulación es grande, el amortiguador no hace nada, si la ondulación es pequeña, el amortiguador actúa con toda su eficacia. Ahora bien, existe una frecuencia para la que se puede dar la resonancia y ser mucho mayor la vibración en la cabina.



Interesa, por tanto, conocer esta frecuencia de resonancia y conseguir que su valor sea lo más pequeño posible. La expresión aproximada que permite conocer el valor de la frecuencia de resonancia, f_0 , en un muro con cámara de aire es:

$$f_0 = 600 \sqrt{\left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}\right) \frac{1}{d}}$$

siendo:

m_1 : masa en kg/m^2 de la primera pared

m_2 : masa en kg/m^2 de la segunda pared

d : distancia en cm entre las dos paredes

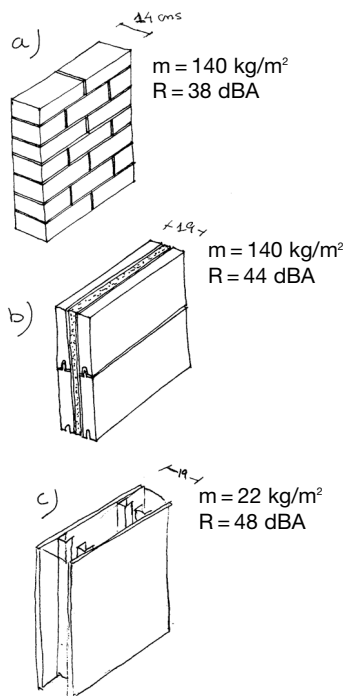
Por tanto, la frecuencia de resonancia disminuye al aumentar las masas de las paredes o al aumentar la distancia entre ellas. Debe conseguirse que f_0 sea menor de 80 Hz.

La cámara que separa las dos paredes es el medio elástico o muelle en el que se basa todo el sistema. En el caso de cerramientos horizontales, es indispensable la utilización de materiales elásticos. En los cerramientos verticales lo más económico es utilizar el propio aire como medio separador.

En este caso, puede aumentarse el aislamiento colocando en la cámara de aire una manta de material absorbente, fibra de vidrio o

corcho poroso. Debe tenerse en cuenta que los materiales aislantes térmicos de celdillas cerradas no son absorbentes acústicos, siendo por tanto su eficacia en este campo nula.

En la figura podemos comparar tres soluciones y sus respectivas R. La a) es una pared de ladrillo cerámico, la b) un doble tabique de escayola, y la c) un tabique doble de paneles de cartón yeso con fibra de vidrio en la cámara (no dibujado). Se comprueba que el método más eficaz para alcanzar las mayores R se basa en las paredes dobles ligeras con cámaras bastante amplias.



Transmisión del ruido de impacto

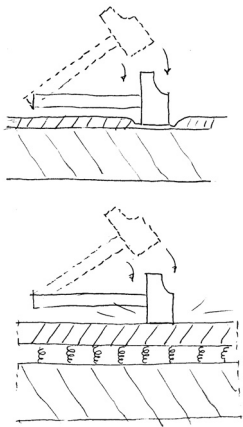
La transmisión del ruido de impacto es mucho más intensa en general que la del aéreo, ya que el golpe que nosotros producimos sobre el suelo tiene un aporte energético mucho mayor.

La experiencia demuestra que un incremento de la masa del elemento constructivo, dentro de los límites tolerables en la construcción, no soluciona la reducción de esa transmisión. Es preciso recurrir a otros medios o sistemas, que en la actualidad son básicamente dos: revestimientos de suelos blandos (textiles o

laminares con reverso de caucho, fieltro, etc.) o bien losas o parkés flotantes.

El primero basa su eficacia en evitar el impacto con su blandura, con lo cual no se les debería llamar aislantes sino "inhibidores".

El segundo método se basa en la utilización de una separación elástica entre el pavimento y el soporte o forjado, semejantes al caso de dobles paredes. La vibración generada sobre el pavimento se transmite con poca intensidad al forjado gracias al amortiguamiento que produce el medio elástico y, en consecuencia, el forjado vibra poco y no genera ruido aéreo en la planta inferior.

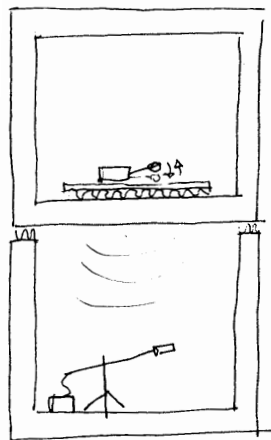


Cabe considerar un tercer método: el falso techo estanco y ligado elásticamente al forjado; pero por sus dificultades de ejecución y poco rendimiento, ya que no evita las transmisiones laterales, su utilización está reducida a casos muy excepcionales.

La utilización de losas flotantes o falsos techos elásticos supone además un incremento en el aislamiento del cerramiento horizontal frente al ruido aéreo, por formar un sistema igual que el de la pared doble. No se puede decir lo mismo de los suelos blandos, por su débil masa y estar ligados directamente al forjado, siendo exclusivamente éste el encargado de aislar el ruido aéreo.

La medida del aislamiento del ruido de impacto que pueden proporcionar los revestimientos de suelos se realiza por un procedimiento diferente al del ruido aéreo. En un laboratorio formado por dos estancias superpuestas y separadas por un forjado macizo de hormigón,

que cumple unas condiciones constructivas y de reverberación fijas, se mide el ruido que provoca en la estancia inferior un máquina de martillos también normalizada, que golpea la moqueta o la losa flotante depositada o construida sobre el forjado. El valor del ruido abajo se denomina L_n . Sin ningún pavimento, el ruido siempre es 82 dBA. Si se coloca una moqueta espesa o una losa flotante gruesa, el ruido puede bajar a 55 dBA, y éste es el valor que caracteriza a estos dos productos. De manera que cuanto más bajo es el número, mejor es el procedimiento, lo cual a veces provoca ciertas confusiones, pero es así.



Materiales absorbentes y dispositivos aislantes

En el ámbito de los aislamientos acústico y térmico, que como el lector habrá podido ver no tienen casi ninguna relación entre sí, es preciso hacer un clarificación terminológica para evitar confusiones conceptuales bastante extendidas.

Cualquier material capaz de formar una pared puede considerarse como aislante acústico, ya que con poca masa siempre es fácil alcanzar 15 o 20 dB de reducción. Según eso, la expresión "material aislante acústico" no tiene sentido ya que cualquier material lo es, pues siempre tiene alguna masa. Por contra, los aislantes térmicos requieren una λ baja para que sus efectos sean apreciables.

Desde el punto de vista acústico sería mucho mejor hablar de dispositivos aislantes o de procedimientos de alto aislamiento. El papel de

los absorbentes, como la fibra de vidrio (el poliestireno expandido no lo es), en el interior de las dobles paredes es incrementar la absorción en la cámara y contribuir al incremento del aislamiento. Pero en sí mismas no son casi aislantes ya que tienen muy poca masa, aunque por eso mismo son aislantes térmicos.

La simplificación del idioma lleva a definirlos erróneamente como aislantes termoacústicos. La expresión correcta debe ser aislante térmico-absorbente acústico.

Algo parecido ocurre con los materiales para aislar losas flotantes. En sí mismos son ligeros y malos aislantes acústicos. Sin embargo, colocados convenientemente, actúan como aislantes de la vibración proporcionando un aislamiento acústico aéreo y de impacto elevado.

COMODIDAD ACÚSTICA MÍNIMA

Valores de los aislamientos mínimos

Las normativas que velan por la comodidad acústica de los usuarios enfocan sus prescripciones hacia los valores de aislamiento D o L_n que deben aportar conjuntamente los elementos de la compartimentación o la envolvente. Los valores que deben alcanzarse varían de un país a otro. En general, los países mediterráneos son más proclives a no exigir demasiado, justo lo contrario de los germánicos (tabla en II-p. 112). Por ejemplo, el CTE-HR acepta para L_n de entrepisos 65 dBA de ruido y la alemana no acepta más de 54 dBA. Las maneras habituales de construir en un país u otro están totalmente condicionadas por estos valores.

Con todo, un buen resultado acústico requiere una buena planificación en la fase de proyecto teniendo en cuenta las siguientes consideraciones.

Influencia de la compartimentación

Organización espacial

El método más efectivo para reducir la molestia del ruido es alejarse de él. Esta afirmación aplicada a edificios puede ahorrar muchos gastos en la construcción de cerramientos, ya que se

ha de pensar primero en la correcta distribución de los espacios, de manera que los ruidosos queden alejados de los de descanso o silenciosos, como dormitorios, que a su vez han de dar a patios interiores de las manzanas, etc.

Sólo cuando se han agotado las posibilidades de distribución de los espacios se deberá pensar en cerramientos altamente aislantes.

Acabados

Los revestimientos de techos o falsos techos, como son superficies que no están al alcance de la mano, son las que pueden utilizarse para situar los materiales absorbentes. En locales con baja agresividad por parte de los usuarios es posible colocar tela en las paredes y moquetas en el suelo con tal de aumentar la absorción. Estas últimas, además, evitarán la formación de ruido de impacto. Ha de quedar claro que estos materiales de revestimiento no aumentan el aislamiento del ruido aéreo de paredes y suelos como se acostumbra creer, lo único que hacen es reducir el nivel sonoro del campo reverberante. El CTE-HR obliga a reducir el ruido en determinados locales, como restaurantes, por medio de los materiales absorbentes de la envolvente interior (II-9).

Paredes interiores

Junto con los forjados y las fachadas con que puedan estar en contacto, deben impedir la transmisión del ruido en sentido horizontal entre viviendas, aulas, dormitorios de hoteles, etc. El CTE-HR exige una D de 50 dBA, que corresponde a una pared simple de 400 kg/m² con R de 57 dBA y unos forjados pesados. Si se adopta el yeso laminado, es suficiente una doble pared de dos paneles a cada lado con un peso total de 49 kg/m² y R de 65 dBA. En II-8.1 se detalla todo ello y se explican otras soluciones.

Entrepisos

Deberán aislar en vertical el ruido aéreo y el ruido de impacto. El CTE-HR les exige lo mismo que a las paredes en lo referente al ruido aéreo,

$D = 50$ dBA, y un ruido máximo de impacto de 65 dBA, sin olvidar la influencia de las transmisiones indirectas, que en este caso pueden estar muy aumentadas por los tabiques. Todas las soluciones requieren una losa flotante sobre un forjado de, como mínimo, 300 kg/m². En II-7 se proporcionan más detalles.

Influencia de la envolvente

Fachadas

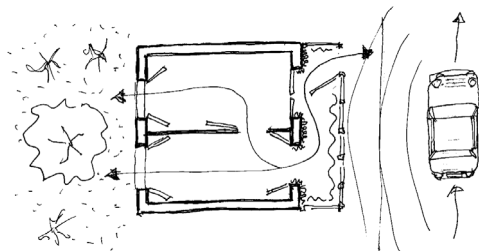
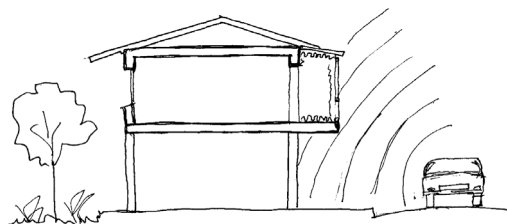
Frente a una carretera o autopista se puede reducir el ruido con barreras acústicas (II-2.2). Dado que su eficacia es relativa, la fachada sigue siendo el elemento que debe aislar del ruido del tráfico. El CTE-HR concreta la exigencia que le afecta en una tabla que relaciona el ruido del exterior y el tipo de local. En una zona muy ruidosa (ruido > 75 dBA), exige 47 dBA para dormitorios y 42 dBA para salas de estar. En una zona algo ruidosa (ruido > 65 dBA y < 70 dBA), estos valores son 37 y 32. Para una zona tranquila (ruido < 60 dBA), la exigencia es la misma en todos los casos, 30 dBA. Si al edificio le afecta el ruido de un aeropuerto, tanto las fachadas como las cubiertas han de participar conjuntamente (III-9.1 y III-9.2).

Si las partes macizas son pesadas, se tendrá que vigilar especialmente la calidad aislante de las ventanas o aberturas. Lo primero a comprobar es que cierren bien y sean totalmente estancas al aire. Sólo si se ha conseguido la estanquidad puede ser útil aumentar la masa del vidrio (III-7.1.1).

Ahora bien, de esta manera impediremos la ventilación del interior de la vivienda que, como ya se ha indicado, es otra de las exigencias imprescindibles desde el punto de vista tanto de la salud (CTE-HS-3 lo exige) como de la posible comodidad térmica en verano. Es necesario buscar soluciones que permitan un buen aislamiento acústico a la vez que una buena ventilación.

Un procedimiento posible combina las fachadas permanentemente estancas con las instalaciones de ventilación, que aportan la renovación del aire pero no refrigeran (III-2.4.1), o las de aire acondicionado, que resuelven las dos cuestiones (II-2.2).

Pero si el planteamiento arquitectónico se basa en reducir el consumo energético al mínimo y aprovechar al máximo los medios naturales de ventilación y refrigeración, la única solución pasa por involucrar decididamente a la propia arquitectura de las fachadas. Un modo, no el único, puede ser disponer un espacio intermedio revestido con materiales absorbentes, que posteriormente pueden ser aumentados por el usuario mediante cortinas, moquetas, sillones, etc., para que actúe como un silenciador a pesar de que las ventanas estén abiertas, pero permita la circulación del aire (ver p. 210).



Al ser habitualmente una solución incompatible con las normas y ordenanzas que regulan la ocupación de los edificios en planta, no existen experiencias en este sentido. Aunque no es sólo responsabilidad de los que redactan las ordenanzas, sino una consecuencia de la actitud de todos los participantes en el proceso edificatorio, arquitectos, constructores, etc., que, como ya se ha dicho al principio del tema, al menos en nuestro país, son especialmente insensibles a la cuestión.

Sin duda, la participación imaginativa de la arquitectura en la defensa de la agresividad acústica del medio urbano es una de sus asignaturas pendientes.

CAPÍTULO III. Integridad

El principio de integridad global

Si los profesionales de la arquitectura no tuvieran durante un período de tiempo bien dilatado ningún tipo de responsabilidad sobre los edificios por ellos construidos, la mayoría de las consideraciones que se desarrollan en este capítulo no serían de su incumbencia. Pero, obviamente, todas las ordenaciones legales del mundo, y como mínimo desde el código de Hammurabi de hace casi 4000 años, especifican claramente que son responsables de que los edificios se mantengan casi como el primer día durante un período de tiempo razonable, y que, especialmente, sus ocupantes estén libres de cualquier riesgo previsible sobre su integridad física durante todos los años que usen el edificio.

Pues bien, este objetivo tan razonable, y en general universal, comporta nuevos requisitos sobre nuestras maneras de construir. No solamente tenemos que conseguir que los edificios sean útiles al acabar de construirse siguiendo lo prescrito en los dos capítulos anteriores, sino que la utilidad ha de ser duradera y segura para los usuarios.

Es el denominado aquí principio de integridad global, que afecta tanto a los edificios como a las personas. Los cuatro temas de este tercer capítulo se organizan a partir de esta idea.

Los edificios comportan riesgos de muy diversa índole para sus ocupantes, desde una caída en una escalera mal concebida hasta una electrocución por un enchufe mal instalado, además de los riesgos relacionados con la higiene tratados en el capítulo anterior. El excesivo número de accidentes de este tipo que se producen en nuestro parque edificado obliga a tenerlos presentes. El CTE-SU establece varias

exigencias relacionadas con la actividad de las personas. En I-8 se recogen algunas más bajo la denominación de Seguridad de uso de los edificios.

Pero existen riesgos importantes que afectan tanto a las personas como a los edificios. Un incendio consume todo lo que encuentra a su paso, personas o materiales. Dada la importancia de la cuestión, el CTE-SI establece todas las exigencias a cumplir. En I-9 se exponen las ideas clave a tener en cuenta.

Una de las posibles causas de un incendio puede ser un rayo. Pero también un rayo puede caer sobre las personas. Si están al aire libre, lejos de cualquier edificio, cuentan con poca protección. Si están cerca de un edificio con pararrayos, éste puede preservarlas atrayendo el rayo hacia él. Si, además, están dentro y con las ventanas cerradas, contarán con una alta protección. Para evitar los daños por incidencia de los rayos, los edificios, según su ubicación geográfica y los materiales que lo componen, deben contar con la protección de un pararrayos; el CTE-SU-8 establece el ámbito de aplicación y el grado de protección (III-3.2).

Las inclemencias climáticas incluyen, además, vientos más o menos huracanados que puede desencajar partes del edificio y caer sobre sus ocupantes. El CTE-SE-AE establece el riesgo según el lugar geográfico y la forma del edificio (I-10).

La causa natural más demoledora es el terremoto, que puede destruir poblaciones enteras y a todos los infortunados pobladores. La previsión del riesgo, que depende del lugar geográfico, queda establecida en la norma NCSE-02 (I-10).

Para finalizar, los edificios están sometidos a agentes de deterioro que actúan de un modo

más bien lento y que principalmente consisten en el agua y el calor (I-11). Deben contrarrestarse antes de que acaben por reducir a ruinas cualquier construcción y, en consecuencia, afecten también a la integridad de las personas. También es preciso conocer el clima para contrarrestar sus efectos en este sentido.

Se ha de recordar ahora todo lo dicho en I-2 sobre las acciones gravitatorias. Es evidente que todas las consideraciones expuestas en él también se pueden situar en este capítulo. Un colapso debido a ellas afecta tanto a la integridad de las personas y edificios como los citados anteriormente. Sin embargo, la experiencia demuestra que son pocos los casos en los que se producen algún fallo de este tipo en las etapas iniciales de la vida de un edificio. En general, la acción gravitatoria produce colapsos, o durante el proceso de puesta en obra, o al cabo de bastantes años, cuando los elementos estructurales han sufrido alguna degradación debida al paso del tiempo. Pero aunque la probabilidad sea baja, es una clave decisiva no olvidar en absoluto que el riesgo existe y que sus consecuencias pueden ser muy graves. Las reglas expuestas en I-2 también forman parte de este capítulo.

En cualquiera de los casos, no sólo los que construyen son los responsables de evitar todas estos efectos negativos. Es el propio usuario quien ha de velar, con un mantenimiento periódico, del correcto estado de todos los elementos del edificio, sean estructurales o no.

Sin embargo, también es cierto que poco puede hacer el usuario si el edificio está mal concebido o mal realizado.

TEMA 8. Seguridad de uso

EVALUACIÓN DEL RIESGO

LAS INSTALACIONES

DESPLAZAMIENTO DE LAS PERSONAS

Fallos en los desplazamientos normales

Desplazamientos no deseados o impedidos

LA INTRUSIÓN

OTROS RIESGOS

EVALUACIÓN DEL RIESGO

El objetivo de este tema se centra en los riesgos que pueden afectar a la integridad física de los usuarios en el desarrollo de una vida cotidiana apacible. Es un tema que, a pesar de su trascendencia, no exige un desarrollo extenso ya que la identificación de los tipos de riesgos es relativamente sencilla, aunque quizá por eso se olvida con excesiva frecuencia.

La evaluación del riesgo ha de considerar que las personas hacen el uso normal predecible de los edificios, incluidos los ancianos, minusválidos y niños, y no una utilización deliberadamente arriesgada. Se supone una conducta razonable y responsable por parte de los usuarios, o, si se trata de niños, de las personas encargadas de su protección. Pero tampoco hay que olvidar que las personas tienen derecho a equivocarse alguna vez en su vida, o que existen situaciones en las que se produce una disminución de la responsabilidad individual como consecuencia de la influencia del colectivo, tal como ocurre en los edificios docentes de etapas básicas, con zonas de alto riesgo, como las de recreo o juego. La evaluación del riesgo ha de contemplar esa posibilidad de error no deliberado que todos podemos tener alguna vez.

La precisión en este tipo de evaluaciones es difícil de conseguir, y en la mayoría de las ocasiones se basan en el juicio y sentido común del que asume la responsabilidad de las decisiones.

La experiencia demuestra que estos riesgos se derivan de cuatro diferentes grupos de causas posibles:

- uso incorrecto o fallo de las instalaciones,
- fallos o errores en los desplazamientos de las personas,
- intrusión de personas no deseadas,
- contaminación del aire expuesta en I-6.

LAS INSTALACIONES

Las potencialmente peligrosas pueden ser de tres tipos:

- las que tienen un potencial energético elevado,
- las que pueden contaminar gravemente el aire y
- las que comportan algún tipo de movimiento.

Entre las primeras se encuentran las de agua caliente, sea sanitaria o de calefacción, los depósitos de los combustibles o las instalaciones eléctricas y de gas. Sus propios fallos o una utilización errónea pueden producir quemaduras de diversos tipos y grados, electrocución o acumulación de un volumen de gas explosivo.

Entre las segundas, se ha de destacar otra vez las de gas que, además de su potencial energético ya citado, tienen la capacidad de convertir el aire en un veneno letal.

Entre las terceras, que se vuelven a citar en el apartado siguiente, están las que facilitan los

desplazamientos de las personas, ascensores, escaleras o rampas mecánicas.

En todos los casos, la prevención de los riesgos se consigue mediante el cumplimiento, por los que las diseñan y las montan, de los reglamentos o normativas específicos y con una correcta y completa información al usuario y a los equipos encargados de su mantenimiento. En III-1 a III-5 se incluyen las consideraciones esenciales al respecto. No se ha de olvidar que reglamentos y normas, por exagerados que parezcan, son el resultado final de un largo proceso de depuración a partir de experiencias acumuladas deducidas de accidentes reales que han ocurrido alguna vez en algún lugar.

DESPLAZAMIENTO DE LAS PERSONAS

Fallos en los desplazamientos normales

Los accidentes en los desplazamientos normales pueden ser de dos tipos: caída inesperada del usuario o golpe por impacto

Las causas de la caída pueden ser de dos tipos: el resbalamiento y el traspíe o tropezón. Se han de distinguir entre los desplazamientos a nivel y aquellos que requieren el cambio de nivel a través de una rampa o escalera.

La prevención del resbalamiento está en la correcta elección del material del pavimento y de su acabado final o bien, en el caso de los escalones, la protección del borde con un material antirresbalamiento.

El riesgo de resbalamiento es mayor cuando los pavimentos pueden estar en contacto con el agua, por ejemplo, en los vestíbulos de acceso de los edificios, o en los vestuarios y duchas en las instalaciones deportivas. El coeficiente de resbalamiento en estos casos se debe analizar bajo los efectos del agua. El CTE-SU-1 le dedica una atención detallada. Véase II-9.2.

Además, se ha de prever que los paramentos con los que se puede impactar como consecuencia de esa caída han de estar exentos de cualquier saliente o elemento que pueda incrementar el daño en el usuario; este aspecto no queda regulado especialmente en el CTE y algunos arquitectos lo olvidan.

La caída por traspíe o tropezón normalmente está asociada a los cambios de nivel más o menos pronunciados, y pueden tener dos tipos de causas: la falta de iluminación de esos cambios de nivel o su mal diseño. La solución de la primera de ellas es sencilla mediante la instalación de la iluminación adecuada, en especial en situaciones de emergencia por fallo de suministro eléctrico o por requerimientos de evacuación urgente. Es objeto de prescripción por parte del CTE-SU-4 (III-2.3).

La resolución del segundo tipo de causas es diferente si se trata de desniveles pequeños o de escaleras y rampas. El segundo apartado del CTE-SU-1 está dedicado a los desniveles de poca consideración, e indica, entre otras, las siguientes condiciones exigibles para lugares de uso público:

- el suelo no debe tener irregularidades de más de 6 mm,
- no se situará un escalón aislado ni dos consecutivos salvo que sea en los accesos o porches.

El diseño de las escaleras o rampas es objeto también de bastantes prescripciones por el SU-1, de las que se destacan las más importantes en II-10. La prevención del riesgo de impacto está contemplada en el CTE-SU-3, donde considera cuatro tipos posibles y diferencia entre elementos practicables o bien fijos. En el caso de los fijos, los clasifica en resistentes al impacto o frágiles, o bien, insuficientemente perceptibles. El SU-3 también incluye el riesgo de atrapamiento por una puerta corredera. Los que tienen relación con puertas o sus huecos se analizan en II-8.2.

La prevención estricta de estas posibles causas y el modo de evitarlas adquiere una trascendencia notable cuando se trata recorridos de evacuación en una situación de emergencia por incendio, tal como se comenta en el tema siguiente.

Los desplazamientos efectuados por medios mecánicos, como ascensores u otros, siempre comportan riesgos que sólo pueden ser evitados, tal como ya se ha citado, por el cumplimiento riguroso de los reglamentos para su instalación y mantenimiento.

Desplazamientos no deseados o impedidos

El último grupo de causas son los desplazamientos no deseados o impedidos. El primero se refiere a posibles caídas desde cierta altura, que se produce en las zonas en que existe un gran desnivel como, por ejemplo, las ventanas. Recibe la atención destacada por parte del CTE-SU-1 en su apartado 3. La prevención de estos accidentes es responsabilidad del diseño de las protecciones de las aberturas al exterior, tales como los antepechos de las ventanas o los parapetos de balcones o terrazas, sobre los que tratan los temas III-7.1.1 y III-7.1.3, o protecciones de las escaleras interiores o exteriores, tal como se indica en II-10.

Entre una de las posibles causas de caída, también prevista por el CTE-SU, está la limpieza de los acristalamientos por sus partes exteriores (III-7.1.1).

Los desplazamientos impedidos son objeto de atención por el CTE-SU-3, que examina el riesgo de aprisionamiento de personas en un recinto cerrado. Su prevención afecta al diseño de los mecanismos de abertura y cierre de las puertas, y se expone en II-8.2.

LA INTRUSIÓN

Se produce cuando alguna persona ajena al edificio consigue penetrar en él con intenciones no honestas y puede afectar a la integridad física del usuario o a la de su patrimonio.

La prevención de la intrusión pasa por dos posibles soluciones y sus combinaciones,

- dificultar el acceso o,
- instalar algún sistema de detección del intruso.

Cabe considerar la capacidad disuasoria de algunas soluciones, desde el “cuidado con el perro”, tanto si hay perro como si no, hasta la exhibición de los sistemas de detección, como, por ejemplo, los bloques de las sirenas o las señales acústicas en las fachadas, de las que se dan indicaciones en III-3.3.

La reducción de la accesibilidad pasa por la primera barrera de la parcela de la propiedad, el muro de cierre, sobre el cual se dan algunas indicaciones en II-2.2, y por la protección de las aberturas en plantas bajas tal como

se indica en III-7.1.4. Es bastante frecuente que el profesional de la arquitectura olvide en sus proyectos soluciones a este problema. Y también lo es que después del primer susto, el usuario coloque unas rejas u otra solución similar normalmente atentatorias contra la unidad estética del conjunto.

Es importante destacar al final de este capítulo, y como inicio del que sigue, que el impedimento de la accesibilidad de los intrusos puede, en determinadas ocasiones, entrar en conflicto grave con uno de los requerimientos fundamentales tratados en el tema que se desarrolla a continuación, como es la facilidad precisamente de la accesibilidad hacia el exterior en caso de emergencia. Estos requerimientos tan contradictorios son uno de los problemas complejos que han de resolver las puertas de acceso a los edificios (III-7.1.4).

OTROS RIESGOS

El CTE-SU prescribe las exigencias que se derivan de la prevención de otros riesgos que, por el tipo de uso de los edificios implicados, quedan fuera del ámbito de estudio del presente texto, aunque, con el objetivo de contemplarlo en su totalidad, se hace una breve referencia a ellos.

El SU-5 considera el riesgo causado por situaciones con alta ocupación, es decir, graderíos de estadios, pabellones polideportivos, centros de reunión, etc., previstos para más de 3.000 espectadores de pie.

El SU-6 aborda el riesgo de ahogamiento en pozos y depósitos o en piscinas de uso colectivo, salvo en las de competición o enseñanza, o las de centros termale, que cuentan con su propia reglamentación.

El SU-7 analiza el riesgo causado por vehículos en movimiento y afecta a zonas de aparcamiento o vías de circulación de vehículos en el interior de los edificios, excluidas las viviendas unifamiliares.

El SU-8 sobre el riesgo de la caída de un rayo se expone en III-3.2.

TEMA 9. El fuego

EL FUEGO Y LOS EDIFICIOS

CLAVES DE LA SEGURIDAD FRENTE AL FUEGO

CLASIFICACIÓN DE MATERIALES Y ELEMENTOS

Reacción al fuego

Resistencia al fuego

EXIGENCIAS DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

La compartimentación

Los revestimientos interiores

Las instalaciones

La envolvente

Las puertas en el recorrido de evacuación

La estructura portante

ACCESIBILIDAD PARA LOS BOMBEROS

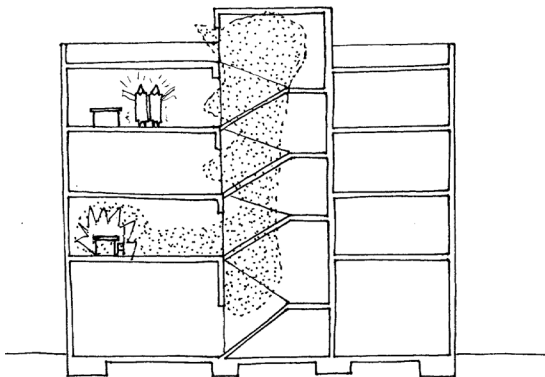
EL FUEGO Y LOS EDIFICIOS

En determinadas situaciones, el edificio, concebido para el desarrollo eficaz de las actividades humanas, puede constituir una trampa mortal para sus ocupantes. En I-10 se exponen casos extremos en los que acciones de tipo mecánico provocan accidentes por caídas de parte o todo el edificio sobre los ocupantes. En este tema la acción es de otro orden, que, a pesar de ser poco frecuente, es la causa del mayor número de muertos en los edificios, incluso mayor a los debidos a los seísmos: el fuego.

No se puede decir que el incendio sea exclusivo de las construcciones humanas, ya que siempre ha existido en un estado natural, hasta el punto de que algunas especies vegetales sacan provecho de él para repoblar zonas quemadas, con ventaja sobre otras especies.

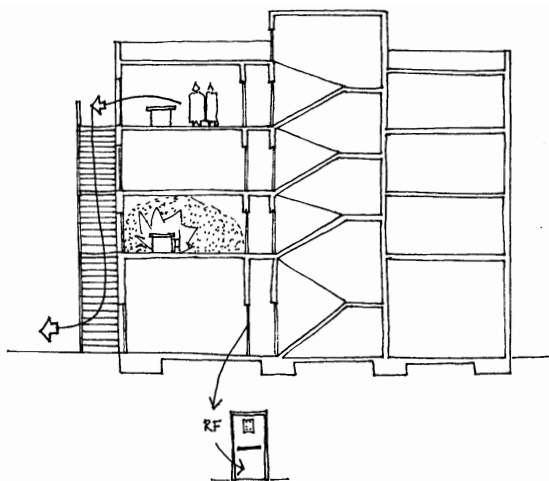
Sin embargo, lo que sí diferencia los incendios de los edificios de los naturales es su grado de peligrosidad. El edificio se convierte, en comparación con el campo abierto, en una auténtica trampa que atrapa a sus ocupantes. La experiencia parece demostrar que esta es la causa principal de la acción mortal del fuego, es decir, la falta de previsión en la organización

del espacio interior del edificio con relación a los aspectos que lo diferencian del espacio natural. Estos aspectos se reducen a dos:



- la propagación y concentración interna del humo y,
- la posibilidad de una rápida huida.

En este libro estas cuestiones quedarán sólo apuntadas. Por ello, hay que insistir una vez más en su importancia definitiva. La posibilidad de la rápida evacuación por zonas libres de humo es el aspecto más trascendente y que cada vez requiere mayor atención por parte de los que diseñan los edificios.



Cabe pensar que una vía para evitar el incendio es la utilización exclusiva de materiales incombustibles. De hecho, en el entorno cultural mediterráneo siempre ha sido así, sobre todo comparado con el anglosajón, que ha utilizado mucho más los materiales leñosos. Pero tampoco es garantía de éxito absoluto frente al fuego ya que los usuarios incorporan en el interior del edificio muchos materiales combustibles, desde libros hasta todo tipo de muebles y ropa, además de los que suelen revestir paredes o reforzar los cerramientos de las aberturas, como papeles o cortinajes.

Además, los edificios contienen diversas causas de ignición, que pueden ser:

- las normales, desde los fuegos impredecibles en la preparación de alimentos hasta los que las personas encienden para su comodidad, como chimeneas o cigarrillos,
- las producidas por fallos o uso incorrecto de las instalaciones, calderas de gas, líneas eléctricas defectuosas, etc.

Tampoco la incombustibilidad de los materiales con que se construyen los edificios, aunque sea total, es suficiente garantía de integridad, ya que muchos pierden su capacidad resistente, aún sin quemarse, como consecuencia de las altas temperaturas. Esta es la característica o clave del comportamiento de las estructuras de acero, desde ya hace años proscritas de la edificación si no están eficazmente protegidas de las altas temperaturas. También el hormigón armado se destruye a las temperaturas de un incendio, y la obra de fábrica

de ladrillo puede fallar de diversas formas, en especial por debilidad de sus morteros.

En definitiva, el fuego es una amenaza constante y cierta contra la que es preciso desarrollar modos de defensa que, sin duda, condicionan la libre expresión de la arquitectura. Pero no por ignorar el riesgo dejará de existir.

La única actitud posible es la que históricamente siempre ha adoptado la arquitectura comprometida con el progreso, incorporar esas necesidades de manera activa e incluso, en muchas ocasiones, creativa.

Un ejemplo histórico pertinente es la transformación de los techos de las naves de las iglesias en la edad media, que pasaron de ser altamente combustibles a incombustibles mediante la utilización de las bóvedas de piedra, una conquista indiscutible de la arquitectura.

Pero también cabe recordar dos ocasiones de gran impacto como fueron los incendios de Londres en 1666 y de Chicago en 1871. Ambas supusieron una profunda transformación de la arquitectura de estas dos ciudades que trascendió bastante más allá de ellas.

Obviamente, parece razonable no esperar a que se quemen las ciudades o edificios para introducir cambios que eviten su destrucción.

En este texto sólo se analizarán las consecuencias de la prevención en la configuración constructiva de cerramientos y estructura, y la participación de las instalaciones. Insistimos una vez más en que no se estudia la variable con mayor efecto en la seguridad de un edificio frente al fuego, su configuración espacial para impedir la propagación del humo a través de espacios verticales continuos, y organizar fluida y eficazmente las medidas de evacuación.

CLAVES DE LA SEGURIDAD FRENTE AL FUEGO

El objetivo de la prevención del incendio consiste, en primer lugar, en reducir al mínimo sus efectos negativos sobre las personas y, salvadas éstas, proteger al propio edificio.

La prevención se puede concretar en seis puntos clave.

- 1) La primera precaución a tomar es que se pueda atacar el mal en su origen, es decir, evitar la declaración del incendio.

En general, los reglamentos de la construcción de edificios normales no incluyen disposiciones de cómo organizar las actividades para reducir este riesgo. Son los reglamentos de uso particulares los encargados de hacerlo, o el propio sentido común, en el caso de usos domésticos, el que debe prever situaciones peligrosas.

Los reglamentos de edificación indican el grado de peligrosidad de las diferentes actividades y, en consecuencia, los diferentes grados de prevención que requieren. En general, los locales de talleres de mantenimiento, almacenes diversos, aparcamientos, etc., están sometidos a unas exigencias más elevadas.

Como causa común a todos los edificios es preciso no olvidar la caída de un rayo, cuyos efectos pueden evitarse mediante la instalación correspondiente (III-3.2).

2) La segunda barrera es detectar el fuego en sus fases más tempranas lo antes posible mediante instalaciones de detección.

3) La tercera clave es la extinción lo más rápidamente posible. Pueden darse dos situaciones alternativas:

- existen instalaciones automáticas de extinción que se activan con éxito,
- los usuarios afectados, mediante el uso de extintores manuales a su alcance, pueden apagarlo rápidamente.

4) Si ninguna de las dos anteriores funciona, los ocupantes del edificio deben evacuarlo, y el diseño de la distribución de pasillos y escaleras ha de permitir hacerlo con la máxima rapidez a un lugar seguro. El servicio de bomberos es el encargado de la extinción con sus propios medios y la ayuda de instalaciones específicas para este cometido existentes en el edificio; el acceso a las partes afectadas es decisiva.

5) Al mismo tiempo, es imprescindible que el fuego declarado no se extienda por todo el edificio y, por ello, todos los reglamentos exigen que partes de la compartimentación y de la envolvente que cierran un denominado **sector de incendios** sean especialmente resistentes a la transmisión del fuego.

6) Por último, la máxima integridad del edificio exigirá, por encima de cualquier otra, la integridad de su propia estructura portante.

La precaución 1) concierne al usuario. Las 2) y 3) a los que construyen el edificio y al usua-

rio, ya que debe velar por el correcto estado de las instalaciones. Las 4), 5) y 6) son responsabilidad sólo de los profesionales que intervienen en el diseño y construcción del edificio. Obviamente, la responsabilidad de los bomberos empieza a partir de la 4).

Cada uno de los puntos anteriores requiere diferentes grados de intensidad en la prevención según el tipo de edificio, que serán mayores cuanto más grande y, en especial, cuanto más alto, y según el tipo de uso, vivienda, residencial, hospitalario, docente, comercial, etc.

En todos los países similares al nuestro existen normativas de obligado cumplimiento que regulan estrictamente el diseño y la construcción de los edificios con el objetivo de reducir a niveles mínimos el riesgo de incendio. En España es el documento del Código Técnico denominado Seguridad en Caso de Incendio, CTE-SI, al que se añaden otros reglamentos municipales o autonómicos. Una compleja legislación común a toda Europa regula las características de los materiales, elementos constructivos e instalaciones considerados bajo el punto de vista de su contribución positiva o negativa al cumplimiento de lo prescrito por el CTE. La complejidad y extensión del documento original son de grado sumo. En este texto sólo quedan expuestos los aspectos más elementales de los criterios y exigencias que dicta el CTE-SI en relación con las instalaciones, la compartimentación, la envolvente, la estructura de los edificios y todos sus materiales. Es importante destacar que queda fuera todo lo relacionado con el diseño de los espacios que han de permitir la evacuación de los usuarios en caso de incendio, denominados específicamente **recorridos de evacuación**.

Es preciso fomentar mecanismos mentales que compensen la tendencia a considerar a las medidas preventivas del fuego excesivamente cautas o exageradas, o que coartan la libertad de los diseñadores o destruyen el valor arquitectónico de elementos como la escalera. Son posturas que pueden ir de la inconsciencia a la frivolidad más irresponsable. Se ha de tener muy en cuenta que todas las medidas de prevención están deducidas de experiencias concretas, todas traumáticas, en las que precisamente por no cumplirse alguna de ellas hubo

pérdidas importantes tanto materiales como, por encima de cualquier otra consideración, de vidas humanas.

CLASIFICACIÓN DE MATERIALES Y ELEMENTOS

Reacción al fuego

Desde 2005 (Real Decreto 312/2005) está en vigor en España la clasificación europea de materiales (UNE-EN 13501-1) que sustituye a la basada en las expresiones M0, M1, etc.

Según la nueva modalidad, la reacción al fuego de un material se determina a partir de su inflamabilidad, complementada por la opacidad de los humos que se generan en la combustión y por el desprendimiento de gotas o partículas inflamadas. La inflamabilidad depende del desarrollo de llamas, velocidad de cesión de calor, etc., y el resultado se indica por una letra A1, A2, B, C, D, E y F que significan lo siguiente: F corresponde a un material no clasificado. A corresponde a materiales no combustibles; si no contribuye en absoluto al incendio es 1 y si puede contribuir algo, 2. Los clasificados con las otras cuatro son combustibles, según el siguiente criterio: B si contribuyen de manera muy limitada al fuego; C, si de una forma limitada; D, media; y E, alta.

La opacidad de los humos se indica por s1, s2, s3 si es baja, media, o alta, respectivamente. La caída de gotas o partículas se indican por d0 (nula), d1 (media) y d2 (alta).

La situación de un material en el edificio también influye en su reacción; no se comporta igual un revestimiento de suelo que uno de techo. Se considera además que los de suelo no producen gotas. Por ello, hasta el momento, a los revestimientos de suelos se les añade el subíndice FL y el indicativo de humos, y a los de paredes y techos ningún subíndice pero sí indicación de humos y gotas.

Así, por ejemplo, un revestimiento de paredes y techos que presente una clasificación B-s1d0 significa que es combustible, que su emisión de humos es baja y que no desprende gotas ni partículas inflamadas. Un revestimiento de suelos que haya obtenido la clasificación de D_{FL}-s3 es algo más inflamable y provoca una alta producción de humos.

Resistencia al fuego

La medición de la resistencia característica también ha cambiado (UNE-EN 13501-2). De manera parecida a la antigua, se valora una variable de esa resistencia durante un tiempo, medido en minutos, 15, 20, 30, etc., hasta 240. Las nuevas variables son: R capacidad portante; E, integridad al paso de las llamas y gases calientes; y I, aislamiento térmico. Así, una pared de carga REI 120 cumple esas tres condiciones durante 2 horas.

EXIGENCIAS DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

La compartimentación

Para analizar el papel que le corresponde a la compartimentación es necesario hacer referencia a la necesidad ya comentada antes de evitar el paso del fuego de un sector de incendio al contiguo. El CTE-SI-1, en su tabla 1.1, establece las dimensiones de los sectores de incendios según el uso del edificio. En general, tienen una superficie máxima de 2.500 m² y, según el caso, puede ser mayor o menor. La complejidad de las situaciones posibles excede la capacidad de este texto, pero líneas adelante se comentan los casos de más interés.

La cuestión clave es determinar qué prestaciones deben aportar los elementos de la compartimentación, sean particiones o entrepisos, que separan sectores. La tabla 1.2 del CTE-SI da la solución relacionando el uso del edificio con su altura y, simplificadamente, queda así:

uso	altura de evacuación		
	< 15 m	15 - 28 m	> 28 m
vivienda (1)	EI 60	EI 90	EI 120
comercial (2)	EI 90	EI 120	EI 180
aparcamiento	EI 120	EI 120	EI 120

(1) Aplicable también a residencial público, uso docente y administrativo.

(2) Aplicable también a locales de pública concurrencia y uso hospitalario.

Así, a una casa de pisos normal de 7 plantas (unos 21 m) le exige EI 90, a un edificio de oficinas alto EI 120 y a un hospital también alto EI 180.

Las puertas que comuniquen sectores de incendio entre sí deben cumplir EI_2 t-c5, siendo t la mitad del tiempo indicado en la tabla anterior (II-8.2).

La tabla 1.1 del CTE-SI establece que, independientemente de los 2.500 m² indicados, en el caso de viviendas, todos los elementos, particiones o entresijos, que las separan entre sí o del las zonas comunes, han de ser EI 60. Algo parecido exige a los hoteles o similares de más 500 m² de superficie cuando exige que las habitaciones estén separadas por elementos EI 60, y sus puertas sean EI_2 30-c5.

En relación con las posibles prestaciones de las particiones más habituales, valga comentar que sus revestimientos pueden aportar incrementos notables, tal como se indica en II-8.1.

Los revestimientos interiores

El CTE-SI-1, en la tabla 4.1, establece las clases de reacción al fuego exigibles a todos los revestimientos interiores según su ubicación.

situación del revestimiento	techos y paredes	suelos
zonas ocupables	C-s2,d0	E_{FL}
pasillos y escaleras protegidos	B-s1 d0	C_{FL} -s1
aparcamientos y recintos de riesgo especial	B-s1,d0	B_{FL} -s1
espacios ocultos	B-s3, d0	B_{FL} -s2

Se entienden como zonas ocupables tanto las de permanencia de personas como las de circulación normales. Se excluye el interior de las viviendas.

Los pasillos y las escaleras protegidos son los que facilitan la evacuación, y sobre ellos se proporcionan algunas indicaciones líneas adelante.

Los recintos de riesgo especiales son los que contienen calderas, almacenes, etc.

Los espacios ocultos no estancos son los formados por los falsos techos, suelos elevados, etc.

Son de destacar dos cuestiones. Los revestimientos de paredes y techos, excepto en aparcamientos, pueden ser más o menos combustibles, B o C, pero no se admite que produzcan gotas, d0. Sorprende que para to-

das las zonas normales se acepte un suelo claramente combustible. En II-9.2 se facilitan algunos datos sobre las prestaciones de diferentes materiales de revestimientos de suelos y se acaba de entender el porqué de esa exigencia tan baja respecto a ellos.

Las instalaciones

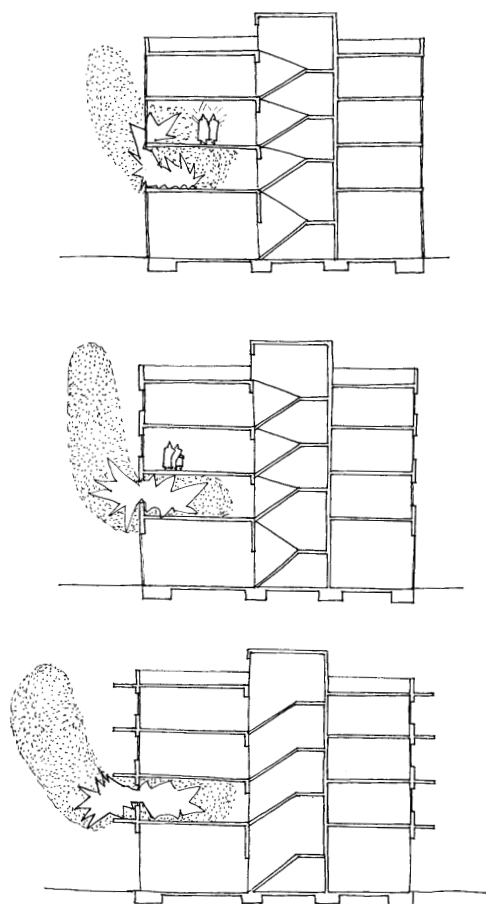
En el supuesto de que el incendio ya se ha declarado, las instalaciones de detección y extinción son las que deben asumir el papel de evitar lo más rápidamente su posible propagación. La instalación cuyo funcionamiento es más inmediato es la detección del foco de incendio y su señal de alarma consecuente. La dificultad proviene precisamente de que, para que sea eficaz, el mensaje ha de ser claro. Más útiles resultan las instalaciones de extinción que actúan directamente sobre el fuego una vez declarado.

Podemos considerar varios tipos: las de puesta en marcha automática, las que requieren la acción del propio usuario y aquellas cuya utilización queda en manos del equipo de bomberos que acude a extinguir el incendio.

Todas ellas están expuestas en sus aspectos básicos en III-3.1.

La envolvente

Se refiere a las aberturas que dan a fachadas o cubiertas colindantes con elementos compartimentadores de sectores de incendios. Es el caso de las ventanas superpuestas de dos pisos consecutivos en los que el forjado es delimitador de un sector de incendio. Los reglamentos exigen que sea realmente difícil la propagación del fuego entre las ventanas, y para ello exigen unos antepechos o dinteles macizos que pueden reducir su dimensión si se añade además un elemento saliente. El CTE-SI proporciona indicaciones muy precisas al respecto, que se exponen en III-8 para las fachadas y en III-9.1 para las cubiertas.

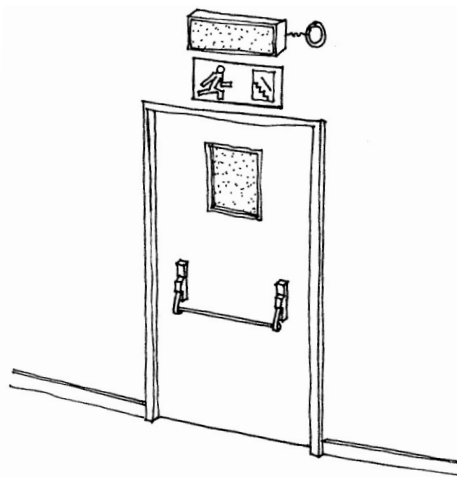


Las puertas en el recorrido de evacuación

Un concepto clave en cualquier reglamento contra incendios es el de recorrido de evacuación. El CTE-SI lo define de manera en apariencia sencilla diciendo que es el recorrido que va desde el origen de evacuación hasta una salida de planta o hasta una salida de edificio. El origen de evacuación, simplificando, son las habitaciones de hotel, los despachos de oficinas, etc., es decir, los lugares donde pueden estar los usuarios del edificio. La salida de planta, es aquella que proporciona acceso a otra zona, pasillo o escalera que puedan considerarse seguros para la evacuación hasta la salida del edificio, como puede ser una escalera protegida. ¿Y cuándo una escalera se puede considerar protegida? Para simplificar, expondremos

una de las soluciones propuestas por el CTE-SI y sus condiciones más importantes. En primer lugar, debe cumplir lo prescrito por el CTE-SU-1 sobre seguridad frente a caídas, que se expone en I-8 y II-10. Ha de estar separada del resto del edificio por particiones EI 120. Puede tener como máximo dos accesos por planta a través de puertas EI2 60-C5, etc., y ha de estar iluminada según lo prescrito por el CTE-SU-4, tal como se indica en III-2.3.

De lo que se trata es de que, una vez activada la señal de evacuación del edificio, pueda efectuarse con la rapidez y seguridad necesarias. Para ello, los elementos que protegen estos recorridos han de presentar resistencia EI elevadas, y, especialmente, el dimensionado de la longitud máxima de los recorridos en planta o bajando escaleras, así como los anchos de pasillos y escaleras han de ser proporcionales a los ocupantes del edificio. El CTE-SI dedica una atención especial a determinar estas exigencias métricas, y cumplir lo que prescribe requiere una dedicación y experiencia notables por parte del diseñador.



Pues bien, en cada salida de planta o de edificio debe situarse una puerta abatible de eje vertical en el sentido de la evacuación, que, entre otras cosas, debe contar con un sistema de cierre de fácil y rápida apertura sin tener que utilizar llave ni accionar más de un mecanismo, habitualmente las barras horizontales de empuje, conocidas como barras antipánico. Además, las puertas que separan sectores de incendio

habrán de cumplir lo indicado anteriormente en la compartimentación. Por si fuera poco, deben evitar la intrusión no deseada en situaciones en que no se utilicen. Todo esto requiere complejos herrajes y mecanismos de seguridad que hacen de estas puertas uno de los elementos más complejos del edificio (III-7.1.4 y II-8.2).

La estructura portante

En el diseño antiincendio del edificio, tan importante es el estudio de la compartimentación como el de la estructura portante. Si aquella está bien concebida y construida, evita la propagación del fuego. La estructura debe mantener sus propiedades resistentes durante el tiempo exigido, para facilitar que los bomberos puedan llegar en su labor de rescate a todos los rincones del edificio en la búsqueda de personas que no pueden desplazarse por sí mismas, ancianos, etc., o que no han podido por quedar afectados por el humo, etc. El hecho de que la estructura se conserve es, además, la condición básica para recuperar el edificio una vez sofocado el incendio.

A los elementos estructurales se les exige una resistencia entre 15 minutos y 180 según su importancia. En general, las exigencias aumentan al incrementarse la altura de los edificios, y llegan a requerirse 180 minutos cuando el edificio sobrepasa los 28 m de altura, tal como se indica en la tabla siguiente:

uso	altura de evacuación		
	< 15 m	15-28 m	> 28 m
vivienda unifamiliar	R 30		
residencial (1)	R 60	R 90	R 120
comercial (2)	R 90	R 120	R 180
aparcamiento en situación 1	R 120		
aparcamiento en situación 2	R 90		

(1) Aplicable también a residencial público, uso docente y administrativo.

(2) Aplicable también a locales de pública concurrencia y uso hospitalario.

La exigencia que afecta a un aparcamiento es diferente si está bajo un uso diferente, por ejemplo, bajo un centro comercial (situación 1),

que si es un edificio aislado de uso exclusivo como aparcamiento (situación 2). Es conveniente recordar que si un elemento participa simultáneamente de exigencias de compartimentación y estructurales, por ejemplo, determinados entrepisos o forjados o algunas de las paredes de carga, la expresión de la exigencia que les afecta es REI y el tiempo necesario, 60, 120, etc.

Las prestaciones de los diferentes materiales estructurales son muy diversas.

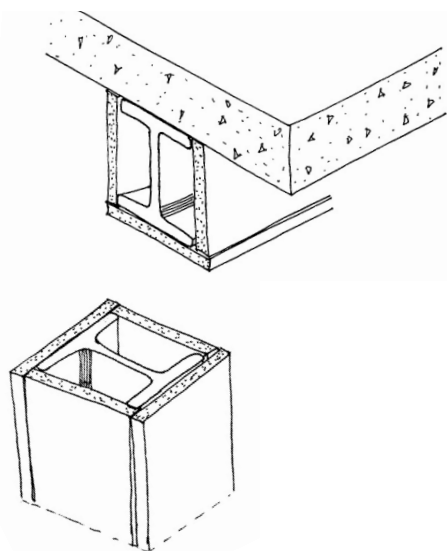
El **hormigón armado** aporta fácilmente las prestaciones exigidas siempre y cuando el recubrimiento de sus armaduras sea el necesario.

El CTE-SI aporta criterios de cálculo y tablas que permiten determinar las condiciones que debe cumplir una pieza de hormigón armada para alcanzar la exigencia que le puede afectar. A modo de ejemplo, se expone de manera simplificada la tabla que proporciona las prestaciones de soportes o pilares. Su resistencia depende del lado menor, que es el que puede sufrir más el efecto del fuego, y de la distancia del eje de las armaduras a la cara del pilar.

lado menor (mm)	distancia (mm)	resistencia
200	20	R 60
250	30	R 90
250	40	R 120
350	45	R 180
400	50	R 240

La resistencia de las **paredes de carga de obra de fábrica**, ladrillo, bloques de hormigón o arcilla aligerada, depende en gran medida de sus revestimientos. Así, por ejemplo, según el CTE-SI, una pared de ladrillo perforado de medio pie (entre 11 y 20 cm) sin revestir aporta una prestación de REI-120, y enfoscada por ambas caras aumenta a REI-180. Aunque el CTE-SI no lo puede asegurar, ya que no dispone del ensayo correspondiente, todo indica que si, en vez de enfoscado con mortero de cemento, se recubre con un guarnecido de yeso, la prestación puede llegar a REI-240.

Sin duda, la estructura que presenta mayores dificultades para ser protegida es la **estructura de acero**, ya que por encima de la temperatura de 550 °C el acero pierde su rigidez.

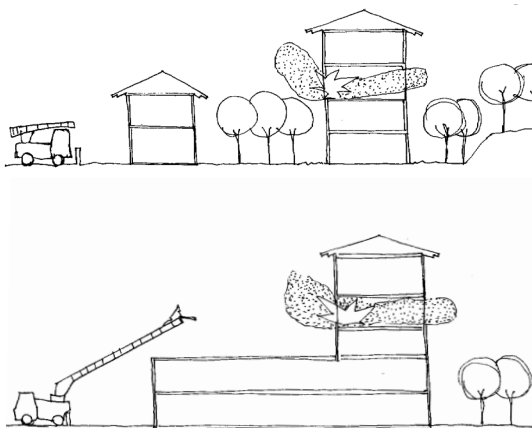


Existen diversos procedimientos que evitan este efecto: desde su envoltura mediante ladrillos guarnecidos con yeso, tableros de yeso laminado o morteros proyectados hasta pinturas intumescentes. Éstas, a pesar de ser sólo de pocas micras de espesor en estado normal, tienen la particularidad de que forman una espuma que protege al acero debido a la volatilización de sus componentes internos cuando la temperatura alcanza la que se produce en un incendio. Sin embargo, en general no están reconocidas por los servicios de bomberos, y el motivo no es que no sean adecuadas, sino porque no se puede garantizar que los sucesivos usuarios de un edificio sean conscientes de su papel protector y acaben suprimiéndolas, lo que no ocurre con los otros tipos de protección.

El CTE-SI proporciona los elementos de cálculo necesarios para determinar los procedimientos que permiten alcanzar las prestaciones exigidas, cuya complejidad excede los límites de este texto.

ACCESIBILIDAD PARA LOS BOMBEROS

La accesibilidad de los bomberos depende, en primer lugar, de la posibilidad de llegar al edificio desde el cuartel correspondiente y, en segundo, de que se pueda acceder al interior del edificio para auxiliar a los afectados o seguir más de cerca con las tareas de extinción. Ya se han indicado antes las exigencias que afectan a las fachadas por este motivo, referenciadas en III-8.



En relación con la accesibilidad al lugar en que se sitúa edificio, si bien no forma parte de este texto establecer consideraciones sobre cuestiones dimensionales y menos urbanas, con tal de que todos los factores en juego hagan acto de presencia, se recuerda mediante la figura la importancia de la cuestión. Cumplir las exigencias que prescribe el CTE al respecto corresponde a la planificación urbanística.

Por último, volvemos a recordar que un tema no tratado aquí como es la organización espacial que facilite una rápida evacuación sin humos, que depende del proyecto básico del edificio, es decir, todo lo que prescribe el CTE-SI sobre los recorridos de evacuación, es lo que puede salvar mayor número de vidas en casos de desastre.

TEMA 10. Los embates horizontales

EL EMBATE DEL AIRE

Acción sobre elementos no estructurales

Acción sobre la estructura

EL EMBATE DE LA TIERRA

Características de las acciones sísmicas

Dificultades de la previsión

La forma del edificio como factor clave

Muros de fábrica

Estructuras porticadas

Los elementos no estructurales

La previsión a escala urbana

Supuesto que el edificio y sus ocupantes tengan la suerte de no verse afectados por un incendio, su integridad tiene otros posibles peligros provenientes de acciones exteriores, del mismo tipo que las gravitatorias, pero ausentes durante el proceso de puesta en obra. Son acciones que se presentan por sorpresa y actúan de una manera bien diferente a la acción gravitatoria, por lo que sus efectos pueden ser mucho más graves por imprevistos. Son las denominadas acciones horizontales, rebautizadas aquí como embates, con el fin de enfatizar ese carácter agresivo, que puede llegar a ser incluso catastrófico.

Son de dos tipos, de origen y de manera de actuar bien diferentes. Por un lado tenemos un fenómeno ya conocido por el estudio del ambiente, el viento, que cuando alcanza grandes velocidades actúa como una auténtica fuerza horizontal sobre los edificios y, por otro, el terremoto, o movimiento de la tierra que, si bien ejerce algunas acciones en vertical, su peligrosidad es consecuencia de sus componentes horizontales.

Sus efectos son muy diferentes. La acción huracanada del viento en realidad pocas veces afecta a la totalidad de la estructura, lo cual no quiere decir que no haya que preverla en su cálculo, especialmente si son edificios de gran altura. Son los elementos más ligeros, fachadas y cubiertas, los que en realidad sufren su

acometida. Es justo lo contrario de lo que ocurre en el caso de movimientos sísmicos, en los cuales los elementos realmente afectados son los estructurales. Veamos cada uno de ellos por separado.

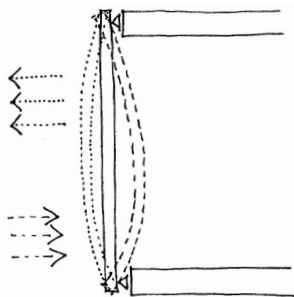
EL EMBATE DEL AIRE

Si se repasan los efectos catastróficos producidos por los vientos huracanados en nuestra geografía podemos comprobar que distan bastante de los que se producen en las zonas en las que es común la aparición de ciclones. En general, nuestra geografía está a salvo de ellos.

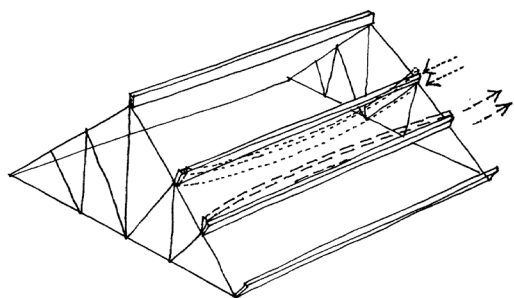
Acción sobre elementos no estructurales

Quando se produce con esta intensidad, los elementos que más pueden verse afectados en su integridad son los elementos ligeros, tanto en fachada como en cubierta, sobre los que puede ejercer tanto una acción de presión como de succión. La correcta previsión de estas situaciones exige, en primer lugar, que las fijaciones a los elementos estructurales sean capaces de absorber los esfuerzos de tracción como consecuencia de las succiones, o de compresión por la presión.

Pero es importante no olvidar que los elementos ligeros actuarán ante el empuje del viento como una placa o una viga ante la acción de la gravedad. Se puede trasladar toda la



teoría sobre las vigas expuesta en I-2 y en I-11 al análisis de los elementos de fachada sometidas al viento, y con más razón a los elementos de cubierta.



Y al igual que veíamos en las vigas, los problemas no se presentarán cuando llegue su rotura, sino mucho antes, cuando una deformación excesiva por exceso de flexibilidad, pueda producir su rotura en elementos más rígidos, como el vidrio, que no pueden acompañar en su flexión a los elementos metálicos.

En definitiva, el cálculo a aplicar a los elementos de fachada será siempre partiendo de la limitación de su flecha por deformación a flexión frente al viento (III-7 y III-8).

Acción sobre la estructura

En pocas ocasiones, por no decir nunca, estas acciones pueden afectar a edificios de poca altura contruidos con los métodos habituales en nuestro entorno. Sólo si se trata de edificios

en altura (sobre los que no discurre este libro), será necesario prever elementos estructurales capaces de contrarrestar los empujes del viento y someterlos a un cálculo riguroso.

En este caso y en general, podemos distinguir dos métodos, ambos basados en que el edificio en altura se debe comportar frente al viento como una viga empotrada en el terreno, al igual que un árbol. La rigidez necesaria para evitar su deformación podrá conseguirse con pantallas rígidas de hormigón armado o bien mediante grandes vigas en celosía que a su vez podrán estar situadas en la periferia o en el núcleo del edificio.

Los dos rascacielos de la Vila Olímpica de Barcelona, son un claro ejemplo de cada uno de los procedimientos.



La estructura de este rascacielos basa su estabilidad frente las acciones horizontales en el núcleo rígido, en fase más avanzada de construcción, formado por las paredes de hormigón armado que cierran los huecos de los ascensores.



En este caso el procedimiento estabilizador lo forman las cruces de San Andrés situadas en los planos de la estructura exteriores a la fachada.

El cálculo de la estructura de un edificio no estará completo si no incluye las acciones del viento y, por supuesto, si las probabilidades del evento lo obligan, si no incluye las acciones sísmicas.

Los valores previsibles del viento quedan normalmente fijados por los reglamentos obligatorios, en España el CTE-SE-AE.

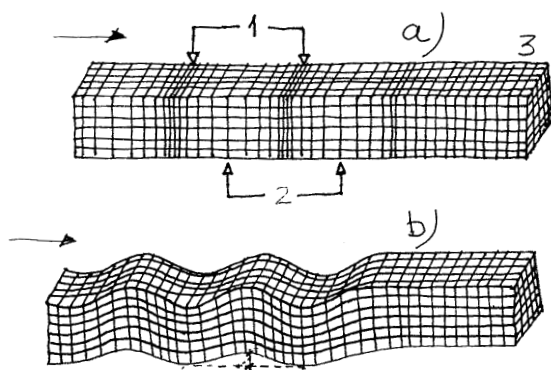
EL EMBATE DE LA TIERRA

Características de las acciones sísmicas

El segundo tipo de embate horizontal, el terremoto, es de mucho mayor peligro. Es un conjunto de movimientos bruscos de la superficie terrestre producidos por el paso de ondas que tienen sus origen, a su vez, en un choque entre dos bloques de la corteza terrestre, que se denomina sismo. El lugar donde se produce este choque se denomina hipocentro. La intensidad del terremoto, que es el efecto del sismo perceptible en la superficie, depende de la distancia al hipocentro.

Las ondas producidas por el sismo son de naturaleza elástica y pertenecen a diversos tipos, las longitudinales, las transversales y algunas otras.

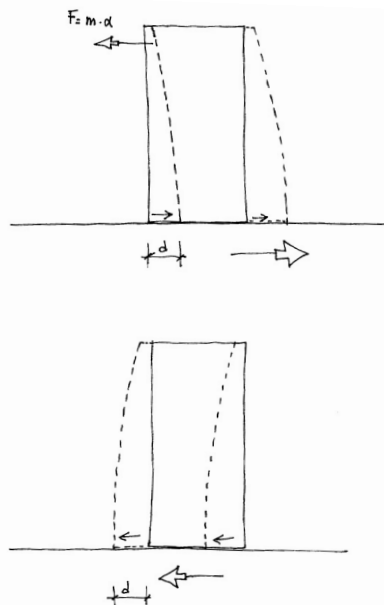
Las que afectan especialmente a los edificios son las primeras, y se desarrollan por la compresión y depresión del terreno que produ-



ce un movimiento vibratorio horizontal en la dirección de la onda sísmica. En la figura a) se representa un movimiento de este tipo que proviene de la izquierda. La zona 3 todavía no está

afectada; las zonas 1 están comprimidas y las 2 están descomprimidas. En la figura b) se representa un caso del segundo tipo.

Debido a que cualquier cuerpo de masa m sometido a una aceleración a responde con una fuerza de inercia, en el sentido opuesto al



de la aceleración de valor $F = m \cdot a$, el efecto del movimiento del primer tipo sobre el edificio es equivalente a una fuerza horizontal y de las mismas características vibratorias en sentido opuesto al terremoto. Esto nos permite entender la razón de ese carácter de embate horizontal.

Las ondas que producen movimientos verticales producen efectos que siempre son menores por ser de menor intensidad que las longitudinales y, obviamente, porque los edificios están diseñados para esfuerzos verticales. Siempre que el coeficiente de seguridad abarque este posible aumento de peso, el edificio podrá responder acertadamente. Los problemas se derivan de los movimientos longitudinales.

La intensidad de estos embates horizontales dependerá, en consecuencia, de las dos variables citadas anteriormente, la masa del edificio y la aceleración producida por el movimiento vibratorio.

Dificultades de la previsión

La probabilidad de ocurrencia de un terremoto es muy diferente según las zonas geográficas de la superficie terrestre. El 80 % de estos eventos tienen lugar alrededor del cinturón que rodea al océano Pacífico. Pero Europa no está libre de esa posibilidad, y Grecia, Italia y parte de la península Ibérica la tienen bastante alta.

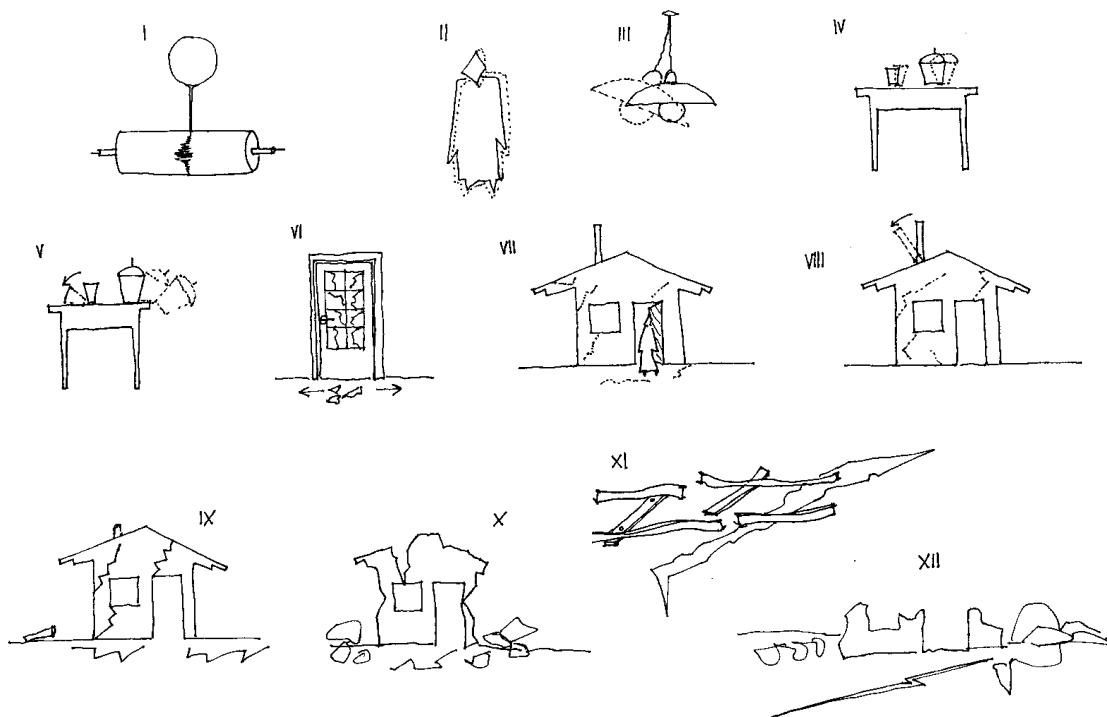
El problema que se le plantea al que tiene la responsabilidad de pensar cómo debe ser un edificio es saber, además de cuáles son las claves para que sea resistente a esos embates, cuál es el grado de probabilidad de que suceda y cuál es la intensidad con la que podrá ocurrir. No todos los terremotos son iguales, sino que existen desde los más leves hasta los más catastróficos.

Si la probabilidad en una determinada región es que se produzcan sólo terremotos leves, no tendrá ningún sentido tomar las medidas precautorias exigibles si estamos en una zona en la que es probable uno de la mayor intensidad posible.

La compleja información que se requiere para poder contestar a esas preguntas no está al alcance de los particulares, sino que sólo puede desarrollarse por organismos públicos dotados de grandes medios científicos. Desde finales del siglo XIX se han desarrollado sistemas de predicción que incluyen las intensidades probables.

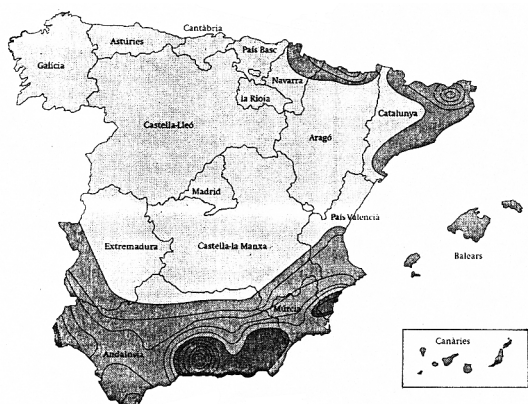
De los métodos para medir intensidades, el más descriptivo es el definido por la escala Mercalli, ya que se basa en los efectos que tienen las diferentes intensidades sobre las personas y los edificios, y se ordena según doce niveles:

I) sólo lo detectan los sismógrafos, II) algunas personas lo notan, III) se balancean los objetos colgados, IV) vibran los vidrios y las vajillas, V) los que duermen se despiertan, VI) se rompen algunos vidrios, VII) la gente sale a la calle y hay pequeños desperfectos, VIII) caen elementos esbeltos como chimeneas, IX) aparecen grietas en el suelo, se derrumban algunos edificios, X) se derrumban casi todos, XI) grandes grietas en el suelo, se doblan las vías del tren, XII) el desastre es total.



Sin embargo, la escala Mercalli, o las posteriores que la hacen más precisa (como la MSK), es una información insuficiente para poder proceder al cálculo de los elementos del edificio que deben soportar estos esfuerzos. Por ello, los diferentes reglamentos de construcción sísmica, junto a la probabilidad de las diferentes intensidades según las zonas geográficas, aportan los valores predecibles de la aceleración (a) que hemos citado al principio.

La norma sismorresistente vigente en España (NCSE-02) prevé la distribución de probables riesgos según el plano adjunto.



La norma obliga a adoptar unas medidas precautorias básicas en el diseño de edificios si la aceleración previsible es $0,06\text{ g}$ o superior (g es la aceleración de la gravedad), y, sólo si es superior a $0,12\text{ g}$ (zona más oscura en el mapa), impone unas condiciones realmente restrictivas a la forma y a los materiales.

Pero, en cualquier caso, las normas sismorresistentes no pretenden obtener construcciones totalmente insensibles a los terremotos, sino obtener la seguridad de los ocupantes frente a la destrucción total y la de su rescate por los servicios de salvamento. En este sentido, los edificios quedan clasificados según los usos a que están destinados. La exigencia es mayor para un hospital o un cuartel de bomberos que para un almacén sin trascendencia en una situación de emergencia. Los edificios cuya destrucción puede ocasionar víctimas o importantes pérdidas económicas, que son todos los demás, deben resistir más que el alma-

cén, pero sin llegar al nivel de los imprescindibles en situaciones de emergencia.

La forma del edificio como factor clave

La forma de los edificios, sea cual sea su tipo de estructura, es una cuestión clave en relación a su respuesta o prestación sísmica global. Las normas recomiendan las disposiciones geométricas en planta que la experiencia de siglos y los análisis precisos actuales demuestran que son las más preparadas ante los sismos. Las plantas han de ser tan simétricas como sea posible y con los elementos resistentes y de arriostramiento formando una composición con dos ejes de simetría ortogonales.

Son desaconsejables disposiciones en planta rectangulares, en forma de "I", "U", "T" o "Z". Y si éstas son imprescindibles es aconsejable descomponer la estructura mediante juntas verticales en cuerpos independientes.

Igualmente, deben procurarse disposiciones geométricas regulares en alzado. Deben evitarse las transiciones bruscas de forma o rigidez entre un piso y el siguiente.

La historia de la construcción en las zonas sísmicas se puede explicar, en parte, por la serie de precauciones que se van incorporando en la configuración constructiva de los edificios, como consecuencia de las experiencias extraídas sobre aquellos edificios que soportaron indemnes eventos sísmicos. Si nos imaginamos el efecto desolador de un seísmo en una ciudad, y que sobre el campo de ruinas emerge un edificio incólume, comprenderemos fácilmente que pase a ser el modelo sobre el que se reconstruya todo.

Quizá, ésta sea una (no la única) de las razones por la que muchas de las características de la construcción en obra de fábrica de la arquitectura clásica son muy favorables a los embates sísmicos dada su simetría y regularidad.

Muros de fábrica

Si la estructura es de muros de obra de fábrica, éstos deben disponerse en planta de la forma más uniforme y simétrica posible, preferible-

mente formando cajones rectangulares continuos en toda su altura. Los forjados deberán estar encadenados a los muros de manera que éstos queden atados por ellos y los muros perpendiculares, con tal de no verse impelidos por los esfuerzos horizontales perpendiculares a su plano. A pesar de todas estas precauciones, en comparación con las de hormigón armado o acero, las estructuras de muros son las menos preparadas frente al sismo. Quedan limitadas a cuatro alturas para aceleraciones superiores a 0,08 g y a dos alturas si es superior a 0,12 g (II-6.1).

Por contra, las estructuras porticadas de hormigón o acero en realidad no tienen limitación en altura si, obviamente, están bien concebidas y realizadas.

Estructuras porticadas

Si el edificio es de cierta altura sólo se puede realizar con acero u hormigón armado y al igual que en el caso del viento puede confiarse la resistencia a estos esfuerzos horizontales a elementos de gran rigidez como pantallas, nudos o triangulaciones, que deberán colocarse en dos direcciones, y en posición simétrica, preferiblemente en el perímetro exterior de la planta, o en caso contrario, en posición central (II-6.2).

Los métodos para hacer que los edificios sean más resistentes a los sismos siguen evolucionando, consiguiéndose mecanismos altamente sofisticados que más que oponer resistencia evitan que el edificio entre en vibración.

Los elementos no estructurales

Las normativas también buscan minimizar la repercusión económica de los posibles daños en elementos no estructurales. Pero muchas veces los efectos en éstos últimos se desprecian y el cálculo sismo resistente se limita a comprobar la estabilidad general de la construcción. La importancia económica, y a veces en vidas humanas, de los daños en elementos no estructurales, obliga a que también se preste atención a su diseño general, a los detalles constructivos de las partes tanto estructurales como no estructurales, y a la interconexión entre

ambas. Este efecto es especialmente importante en los edificios de gran altura con estructura de acero y cerramientos de vidrio o paneles de hormigón con tabiquerías ligeras, en los que la rotura de estos elementos, aún con una total resistencia de la estructura principal, puede ser causa de numerosos accidentes personales y costes de reparación importantísimos.

La previsión a escala urbana

Sin duda, la situación más catastrófica se produce cuando se suma la acción del terremoto a la acción vista en el tema anterior, el fuego. En la mayoría de las ocasiones el primero provoca el segundo ya que la destrucción de los edificios comporta la rotura de las conducciones de gas y la explosión de éste y el incendio posterior como consecuencia de los fuegos domésticos o de las calderas. Poco puede hacerse desde el diseño de los edificios además de lo ya dicho. Sólo el diseño de la ciudad, la anchura de sus calles como la más importante y el entrenamiento de sus servicios de urgencias, podrán paliar los efectos de esas catástrofes, tanto más graves cuanto mayor y desordenado es el desarrollo de la civilización urbana.

TEMA 11. El paso del tiempo

LA DEGRADACIÓN A LARGO PLAZO

- La duración de los edificios
- La prevención de la degradación inevitable
- Causas de las degradaciones

CAMBIOS EN LA FORMA DE LOS ELEMENTOS

- Causas cíclicas
 - Dilataciones y contracciones térmicas*
 - Cambios cíclicos de humedad*
- Causas no cíclicas
 - Cambios definitivos de humedad*
 - Corrosión del acero*
 - Fuerzas exteriores*

CAMBIOS EN LA ESTRUCTURA FISICOQUÍMICA DEL MATERIAL

- Causas químicas
 - Acción de ácidos y sales en la obra de fábrica*
 - Deterioro de la madera*
 - Corrosión del acero*
- Causas físicas
 - Disgregación*
 - Erosión*
 - Cambios de aspecto*

LOS MÉTODOS DE PREVENCIÓN DE LA DEGRADACIÓN

LA DEGRADACIÓN A LARGO PLAZO

La duración de los edificios

El paso del tiempo es inexorable con los edificios. Por mucho que se quiera evitar, los elementos constructivos experimentan variaciones en sus características definitorias fundamentales (es decir, sus formas generales y su estructura fisicoquímica), de tal tipo que tarde o temprano pierden parte de sus prestaciones iniciales.

Se denomina durabilidad a la capacidad de los edificios, o de sus elementos o materiales, de permanecer al cabo de períodos de tiempo prolongados sin degradaciones importantes manteniendo en casi su totalidad las prestacio-

nes originales. Generalmente una durabilidad más o menos alta es una exigencia imprescindible para cualquier edificio no efímero.

La valoración de la gravedad del deterioro debe tener en cuenta la expectativa normal sobre la vida útil de los edificios o la de sus diferentes subsistemas o elementos. No es lo mismo un deterioro producido al cabo de cincuenta años que al cabo de dos, y no es lo mismo que afecte a la estructura que a un pavimento fácilmente reponible.

No existen valores fijos sobre el período de tiempo total que razonablemente puede esperarse para la vida útil de un edificio en su conjunto y la de sus partes. Pero, sin duda, la expectativa es mucho mayor que para otros

productos humanos. Por ejemplo, un ordenador con tres años ya empieza a ser digno de sustitución. Uno de diez es una rareza y uno de treinta es una auténtica pieza de museo. Los coches tienen unos períodos algo mayores. Pero uno de treinta es un artefacto no muy seguro que es mejor dejar aparcado. Por contra, un edificio de treinta años está en su primera juventud. Sin duda, de los edificios se esperan períodos útiles que se acercan como mínimo a los cien años.

La expectativa es diferente para cada uno de los elementos, y tanto mayor cuanto más difícil es su sustitución. La estructura portante y los elementos básicos de la fachada han de durar tanto como el edificio, obviamente. Pero la duración razonable de los elementos más débiles de una fachada, carpinterías, persianas, puede oscilar entre 25 y 50 años, la de las instalaciones de 10 a 25, la de las telas impermeables de cubiertas de 10 a 15, la de pinturas y barnices de 5 a 10, la de masillas de sellado de juntas de 3 a 7, y la de una bombilla, menos de 2.

Que un edificio y sus elementos puedan llegar a esas edades no depende sólo de lo bien o mal que se construya, sino del uso y cuidado de sus usuarios. Las labores de mantenimiento y sustitución a tiempo de las partes deterioradas son fundamentales.

A pesar de todo ello, en este ámbito como en muchos otros, los deseos de la sociedad están en proceso de cambio acelerado. La duración era una exigencia mucho más valorada en las épocas anteriores al siglo xx. La vanguardia rupturista de la década de 1920 propuso precisamente la arquitectura efímera para distanciarse de un pasado en el que la permanencia a largo plazo era una de sus bases. Pero es razonable afirmar que la sociedad actual no es tan revolucionaria y sigue pidiendo que los edificios duren cuanto más mejor.

Sin embargo, más que las vanguardias, tres vectores de la evolución de la sociedad y la producción edificatoria, que se adivinan en un horizonte más o menos cercano, comportarán tarde o temprano cambios en este sentido:

- la prioridad dada a la reducción de costes, al confort y a los aspectos puramente estéticos genera innovaciones con resultados

inciertos en su durabilidad que generalmente comportan elementos y edificios más degradables,

- a su vez, unas producciones industriales muy dinámicas, cada vez más innovadoras, dejan anticuadas soluciones mucho antes de su degradación física, a lo que se ha de añadir que,

- la velocidad y la intensidad del cambio de los gustos y las costumbres es mucho mayor que la adaptabilidad de los edificios.

Si estas tendencias se confirmaran se reduciría el ciclo construcción-demolición (total o parcial) lo cual requeriría una nueva manera de construir en la que lo reciclable sería un valor en alza y lo durable en baja. Obviamente, sólo son especulaciones, pero que son válidas para recordar que no estamos en una situación estática como pudo ocurrir en los siglos anteriores (sobre las implicaciones ecológicas de todo ello véase I-12).

Aunque quizá ese horizonte no esté tan lejano. El caso de innovaciones ya añejas como el hormigón armado dejado visto sin revestimiento u otras más recientes, como determinadas maneras de resolver aislamientos térmicos elevados, comportan degradaciones bastante más prematuras que las que se producían en la construcción tradicional.

Con todo, los ordenamientos legales de todos los países dictan los períodos de responsabilidad económica de los profesionales que participan en la construcción. En concreto, la LOE española indica que, durante tres años, responderán por los daños materiales causados por defectos que afecten a la habitabilidad, y durante diez años por los de seguridad estructural del edificio. El CTE está ausente en las próximas páginas ya que no dicta nada sobre durabilidad, aunque muchas de sus prescripciones respondan implícitamente a ella.

En cualquier caso, el ciclo constructivo es más largo que esos diez años, y moralmente debemos evitar también la degradación a largo plazo. Veamos cómo.

La prevención de la degradación inevitable

Cinco ámbitos interrelacionados del conocimiento son importantes para un profesional de la arquitectura para paliar esa degradación inevitable:

- las causas originarias y las velocidades de producción de estos procesos de degradación,
- los métodos de prevención aplicables en la fase de concepción del edificio que condicionan el diseño de sus formas y la elección de sus materiales,
- los métodos de prevención aplicables en los dos momentos de la fase de producción, la manufactura de los materiales y su puesta en obra,
- los métodos y costes de prevención y reparación de la degradación aplicables durante la vida del edificio englobados bajo el concepto de mantenimiento,
- y, como consecuencia de ello, un aspecto generalmente olvidado en la fase de concepción o proyecto, la reparabilidad, o facilidad de reparación de los diferentes materiales o procedimientos.

El objetivo de este tema se centra en el primer ámbito, las causas originarias, aunque se establecen algunas indicaciones sobre el resto. La prevención en el proyecto, la puesta en obra y la reparabilidad se acaban de desarrollar en el tomo II para cada uno de los diferentes elementos constructivos. El cuarto ámbito, el mantenimiento, no forma parte directamente de este libro, aunque se incluyen algunas indicaciones básicas cuando se ha creído conveniente.

Una vez más se ha de insistir en que todo está interrelacionado. Las decisiones adoptadas en un ámbito han de tener en cuenta los otros.

Por ejemplo, los métodos de prevención en la fase de concepción del edificio se concretan en dos tipos de decisiones que han de tener en cuenta las condiciones de mantenimiento:

- la elección de materiales o formas se ha de hacer considerando su capacidad para durar en las condiciones previsibles de mantenimiento y su reparabilidad si éste es difícil; no es

lo mismo proyectar una vivienda urbana que una situada en un lugar aislado y lejano,

- el diseño del edificio ha de prever la accesibilidad a sus partes o materiales más susceptibles de degradarse, como las cubiertas o los elementos de acero o madera, precisamente para poder repararlos.

En la fase de producción (I-12, 13 y 14), la recepción de los materiales manufacturados se ha de hacer siguiendo las especificaciones del proyecto, y deben rechazarse mediante el control de calidad aquellos que pueden ser susceptibles o causantes de degradaciones. Su puesta en obra ha de estar también sometida a una estrecha vigilancia, además de para evitar fallos, para que pueda reflejar con exactitud su realidad en los documentos gráficos y escritos, imprescindibles para la fase de mantenimiento.

Los encargados de éste han de conocer el proyecto y su materialización real con exactitud, lo cual obliga a que la redacción del manual de uso del edificio se haga por parte del mismo equipo que lo ha construido, y en él se han de dar indicaciones sobre las inspecciones a realizar y sus frecuencias, con el fin de detectar en sus fases más iniciales las posibles degradaciones.

Los estudios estadísticos realizados por diversas entidades interesadas en el control y la prevención de riesgos, como las compañías aseguradoras de edificios o de profesionales en ellos implicados, son una referencia inevitable para ponderar la influencia que tienen los errores ocurridos en las diferentes fases de la construcción del edificio en su degradación.

A grandes rasgos, y sin que se pretenda ir con las siguientes cifras más allá de una referencia general, se puede decir que:

- la fase más influyente es la de concepción, diseño o proyecto, causante de un 40 % de los casos de degradación,
- la fabricación de los materiales sólo lo es en un 15 % debido a que es la fase de producción más industrializada (I-12),
- la puesta en obra alcanza un 35 %, y,
- la de mantenimiento sólo es responsable de un 10 %.

Nada menos que el 75 % de los casos están producidos por errores de los profesiona-

les de la arquitectura, repartidos a partes casi iguales entre los que conciben los edificios y los que los materializan.

Dicho todo ello, veamos en su conjunto las causas de los posibles deterioros.

Causas de las degradaciones

Las causas de deterioro se pueden agrupar en dos grandes clases definidas por las dos claves constantes del construir arquitectónico, la forma y el material:

- los cambios en las formas iniciales del edificio o en sus elementos o deformaciones, que también se pueden llamar “movimientos” si son de tipo cíclico,

- los cambios de la estructura fisicoquímica de los materiales.

En realidad, es difícil distinguir entre causas y efectos, ya que siempre se produce una concatenación en la que cualquiera de los tipos de degradaciones existentes es efecto y causa a la vez de nuevas degradaciones. Así, las deformaciones del edificio, si producen rupturas en la continuidad de los materiales, pueden provocar variaciones químicas y físicas. Pero, a su vez, las deformaciones también pueden ser consecuencia de cambios físicos o químicos.

Por ejemplo, una grieta producida por la deformación del terreno en una fachada con humedades por capilaridad supondrá su pérdida de estanquidad con la consecuente entrada de agua de escorrentía por el interior del muro de fachada y un agravamiento del deterioro ya producido por el agua antes de la ruptura, que a su vez ha venido facilitada por la disminución de la resistencia del material debido a la humedad. Como siempre, todo está interrelacionado y casi siempre una degradación es consecuencia de la conjunción y concatenación de diversas causas.

Hecha esta salvedad, podemos empezar el análisis de las causas de la degradación de los edificios por lo más visible, las deformaciones, especialmente aquellas que suponen pérdidas de continuidad o roturas en los materiales, y a continuación seguir por los posibles cambios físicos y químicos que se producen tanto si hay

rupturas como si no, pero que se pueden agravar si las hay.

Pero antes, es conveniente recordar lo ya dicho en I-3 sobre la acción del agua. Si se busca alguna constante que acompañe prácticamente todas las causas de las degradaciones, se encuentra una: el agua. Una gran parte de las deformaciones y la casi totalidad de las acciones de origen físico o químico están producidas o potenciadas por el agua. Los fallos en las soluciones tratadas en I-3, que pueden provocar filtraciones o condensaciones, son el origen seguro de algún tipo de degradación.

Sin embargo, evitar esos fallos no es suficiente ya que la cara exterior de la envolvente siempre está en contacto con el agua. El diseño de sus elementos, cubiertas, fachadas, etc., ha de tener en cuenta las causas de degradación debidas al agua que se exponen en los apartados siguientes, evitando que permanezca sobre ellos, facilitando su escorrentía.

Si añadimos a lo anterior que los cambios de temperatura, como se comprueba líneas adelante, también son causa de posible deterioro, podremos concluir una vez más que el clima del lugar pasa a ser un dato importante para el que quiere construir y no sólo en relación al ambiente. Una vez más, sol y agua son claves a conocer a fondo.

CAMBIOS EN LA FORMA DE LOS ELEMENTOS

Entendemos por deformaciones los cambios producidos en la forma de los edificios o sus elementos, cambios que afectan a sus características geométricas, longitud, anchura, alineación, etc., o de su posición, verticalidad, horizontalidad, etc., y que la mayoría de las veces pasan inadvertidas a no ser que produzcan alguna rotura.

Su incidencia en el deterioro puede tener varios grados según sean los efectos que produzcan, a saber:

- a) facilitan o provocan nuevas degradaciones por nuevas deformaciones o variaciones químicas o físicas.

- b) no provocan ningún tipo de deterioro posterior, pero:

b.1) impiden el funcionamiento de algún elemento,

b.2) no impiden el correcto funcionamiento de ningún elemento del edificio y sólo son molestas visualmente.

Obviamente, nuestra preocupación se ha de centrar en las primeras, pero sin olvidar ni mucho menos las segundas. Una deformación de un parqué que impide que se ande por él es, evidentemente, inadmisibles aunque no cause más problemas (p. 134).

La provocación de nuevas degradaciones, como se ve en las líneas que siguen, casi siempre va asociada a la ruptura producida por una deformación diferencial entre dos partes o elementos contiguos debido a que se alcanzan unos valores de tensión por tracción superiores a los que resiste el material.

El método más adecuado para clasificar las causas de las deformaciones, cuando de degradaciones a largo plazo se trata, es su relación con el paso del tiempo. Según eso, podemos tener:

- a) deformaciones cíclicas (o movimientos), diarias o estacionales, determinadas claramente por las variaciones climáticas de temperatura y humedad, sol y agua,

- b) deformaciones irreversibles, originadas por causas diversas, que a su vez se pueden diferenciar en:

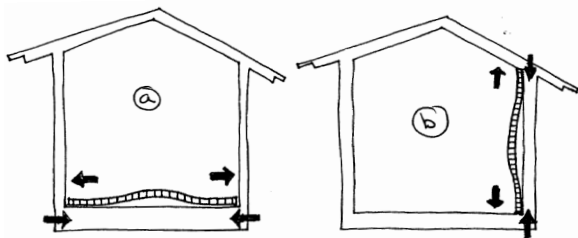
b.1) las que se producen poco después o durante la construcción del edificio, tales como los cambios definitivos en el contenido de humedad de los materiales,

b.2) las que, a pesar de actuar desde el primer momento, sólo se advierten, normalmente, a largo plazo, tales como las debidas a la corrosión del acero, o la deformaciones de los elementos cargados.

En definitiva, podemos tener deformaciones en todos lados. Sin duda, como se suele decir, los edificios se mueven.

Ahora bien, se ha de insistir en que los problemas no se presentan porque haya deformaciones, sino cuando elementos contiguos tienen deformaciones diferentes. Son los movimientos diferenciales de unas partes del edificio respecto a otras los que producen rupturas en

forma de grietas o de fisuras, que pueden reducir la estanquidad al agua o al aire.



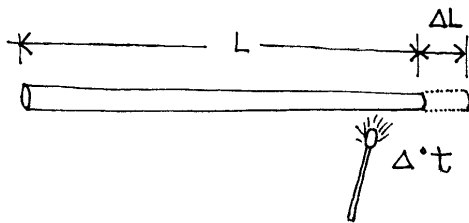
Veamos ahora las causas algo más en detalle, ordenadas según la clasificación anterior. Las soluciones que se presentan son preventivas y no curativas como correspondería a un tratado de patología, cosa que no pretende ser este libro. Las soluciones se completan con las expuestas en la parte II de este volumen para cada uno de los subsistemas constructivos.

Causas cíclicas

Dilataciones y contracciones térmicas

Es bien sabido que cualquier elemento material cuando se calienta aumenta de volumen o de longitud.

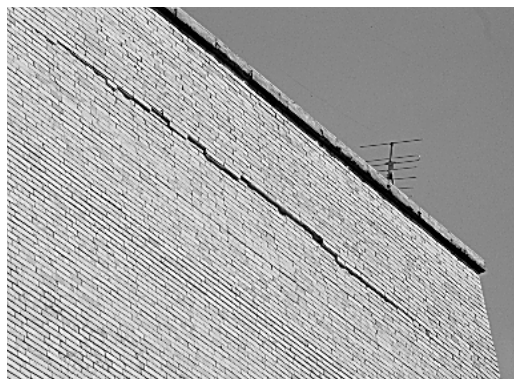
La característica propia del material que regula este fenómeno es el llamado “coeficiente de dilatación” normalmente expresado con la letra alfa y la ley que lo rige se expresa fácilmente con la fórmula $\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta t$.



Como ya se ha indicado, no es tan importante el hecho de que se produzcan dilataciones como que lo hagan de manera diferente dos elementos contiguos. Los valores de alfa (α) de los materiales de construcción son pequeños y están alrededor de $10^{-5} \text{ m/m}^\circ\text{C}$.

Si bien a primera vista puede parecer que no se producen grandes cambios de temperatura en los edificios, si observamos atentamente la temperatura que pueden llegar a alcanzar elementos de una cubierta plana o de un tejado después de haber tenido un asoleamiento directo durante diez horas en un día de verano, y lo comparamos con la temperatura que puede llegar a tener en una noche fría de invierno, podemos comprobar que estas variaciones pueden ser del orden de 100 °C. Si el material de una cubierta plana tiene un coeficiente de dilatación de 10^{-5} y una longitud de 50 m, es fácil comprobar que entre los dos estados extremos de temperatura hay una diferencia del orden de 5 cm. Pero esto no es lo más importante, sino que los elementos que hay debajo de este elemento de cubierta, precisamente porque están protegidos, no llegan nunca a estas temperaturas tan extremas, y en consecuencia sus deformaciones son más pequeñas; es decir, tenemos deformaciones diferenciales.

En el caso de la cubierta es donde se puede comprobar la realidad de este efecto, observando infinidad de edificios que tienen en la parte superior del remate de la fachada una grieta horizontal situada en la base del antepecho de la cubierta.



Rotura de la fachada como consecuencia de la dilatación de la cubierta.

Otro caso a recordar es el comentado anteriormente en I-4 sobre la dilatación diferencial producida entre un muro exterior de fachada con un fuerte aislamiento posterior.

Los casos son innumerables.

A pesar de ser las deformaciones de dilatación cíclicas y teóricamente reversibles, generalmente, una vez producida una ruptura nunca se vuelve a cerrar por sí sola, ya que siempre va acompañada de algunas de las otras causas no reversibles.

Las soluciones pasan por evitar las causas o por controlar los efectos.

Evitar las causas acostumbra requerir decisiones en el diseño inicial. Por ejemplo, en la fachada citada antes, adoptar otro tipo de solución en la que no se produzcan dilataciones diferenciales, tales como una fachada homogénea o con aislamiento exterior (III-7.2).

Controlar los efectos acostumbra basarse en las llamadas "juntas de dilatación", que pueden afectar sólo a los elementos o a todo el edificio. Es una práctica habitual que cuando un edificio tiene una longitud de 30 o 40 m quede cortado todo él por una junta de dilatación (II-6).



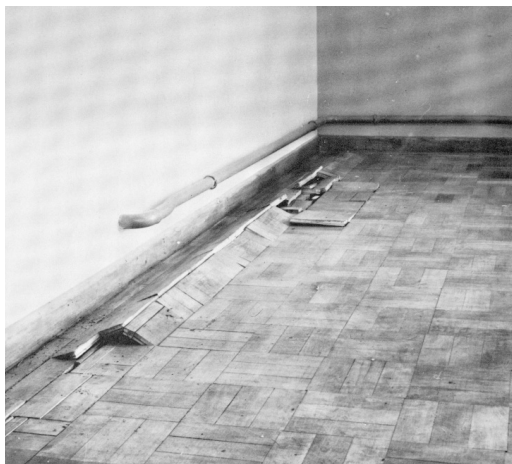
Junta de dilatación que divide el edificio, estructura y envoltente, en dos partes totalmente independientes entre sí a efectos térmicos.

Las cubiertas planas transitables convencionales se subdividen en superficies de como máximo 30 o 40 m². Las tejas o placas solapadas de las cubiertas inclinadas quedan libres para dilatar (III-9).

Cambios cíclicos de humedad

Los materiales higroscópicos experimentan deformaciones por dilatación o contracción según el contenido de agua que contiene sus poros. El que más los acusa es la madera y sus derivados, aunque todo material poroso queda sometido a ellas.

La madera, cuando pierde agua, disminuye de volumen, y viceversa. Esto se puede ver cuando se ha construido un pavimento de madera aún muy húmeda y al cabo de un tiempo empieza a agrietarse; o, al contrario, si se ha construido con madera excesivamente seca, cuando vuelve a absorber la humedad del am-



El efecto de la figura se produce cuando la madera aumenta el contenido de humedad después de colocada, porque se colocó excesivamente seca u otras razones. Al estar constreñida su dilatación por las paredes perimetrales, queda sometida a unos esfuerzos de compresión que la acaban deformando por pandeo hacia la cara con libertad de movimientos, es decir, la superior.

biente se llegan a producir levantamientos del pavimento. Una vez estabilizado el contenido de humedad, las deformaciones de la madera son variables según las variaciones climáticas.

La mayoría de las estrategias aplicadas a la elaboración de elementos de madera, desde el corte de los troncos como los tipos de empalmes, están orientados a contrarrestar las deformaciones por cambio de humedad que no sólo pueden ser diferentes entre dos elementos, sino que lo son entre las diferentes partes del tronco o según sea la dirección que se considere. Véase I-13.

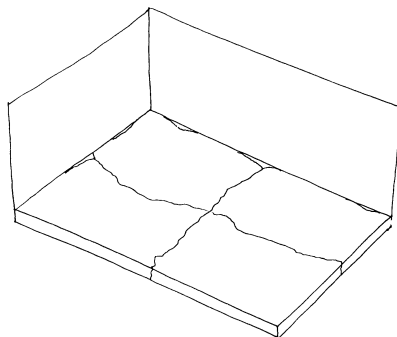
Las soluciones a aplicar son conceptualmente parecidas a las de las dilataciones térmicas. O las evitamos con el diseño o las contrarrestamos con juntas que permitan el movimiento.

Causas no cíclicas

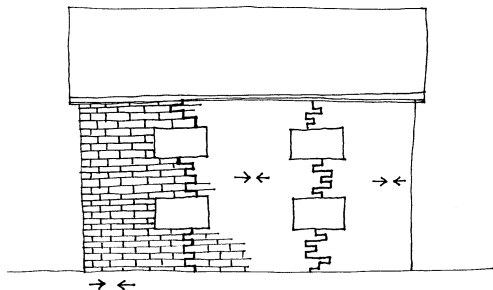
Cambios definitivos de humedad

Los materiales que se obtienen a base de morteros u hormigones de cemento portland en las fases iniciales de su puesta en obra, a medida que se produce el fraguado, se van desecando y reducen su volumen produciendo una deformación irreversible. El efecto es tanto mayor cuanto mayor es el contenido de cemento.

Si se produce de una manera homogénea a lo largo de todo el elemento construido, aparecen pequeñas fisuras; pero, normalmente, se concentra en determinadas zonas y aparecen grietas que, tal como hemos dicho, pueden ser un camino de penetración del agua de la lluvia y afectan la integridad fisicoquímica de los materiales. Dos casos pueden ser representativos. El primero, los pavimentos de hormigón, que si no se prevé quedan rotos por fisuras que lo cuartearán.



El segundo se presenta cuando el mortero con el que se realiza una pared de ladrillo es excesivamente rico en cemento. Las grietas se concentran en la parte de la pared con menor sección frente a una tracción horizontal, que son las que están por encima o debajo de los huecos.



Las soluciones siempre pasan por la prevención de las causas, básicamente reduciendo las dosificaciones de morteros u hormigones hasta el mínimo imprescindible, o controlando los efectos mediante las llamadas "juntas de retracción". En el caso de los revestimientos continuos de fachada, con juntas que deben formar parte de la composición de las fachadas (I-15 y III-7.2). En el caso de un pavimento de hormigón, una solución pasa por cortar con una sierra la masa de hormigón a los dos días de haberlo colocado con tal que



Corte de un pavimento de hormigón.

se concentre en el corte la disminución de volumen y, posteriormente, si es necesario, sellarla. Otros tipos de solución se comentan en I-15 y en II-1.2.

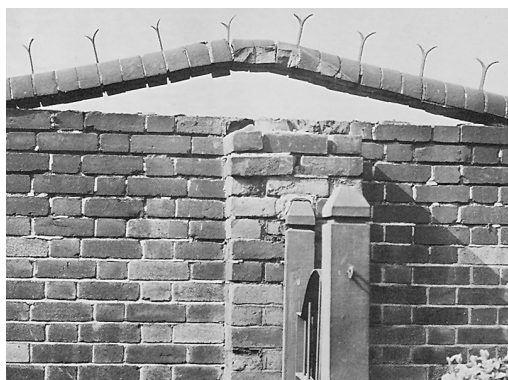
Los casos de un muro de contención de hormigón o una fachada excesivamente larga se han de construir desde el principio con su junta de retracción (II-2.1 y III-7.2).

El caso del pavimento interior que se levanta por la retracción de su soporte se prevé retardando lo más posible la colocación del pavimento, a la espera de que se produzca el máximo de retracción y, además, se coloca una junta perimetral.

El caso del yeso es justamente el contrario. Sufre un ligero aumento del volumen aunque con valores menores que los anteriores. Algo parecido les pasa a algunos materiales cerámicos.

Corrosión del acero

La corrosión del acero en sí misma no es una deformación, pero sí sus efectos cuando el metal está envuelto por materiales como el hormigón o la obra de fábrica de ladrillo, que teóricamente lo protegen contra ella. Los óxidos de hierro que se producen aumentan de manera inexorable el volumen del acero original. El efecto habitual sobre la obra es sencillamente su rotura al no contar con la suficiente resistencia a tracción, aunque también pueden aparecer otros efectos semejantes a una dilatación.



Caso realmente poco frecuente pero muy revelador de los efectos dilatadores de la corrosión del acero, en este caso de las piezas empotradas en las juntas de la albardilla que la han sometido a un esfuerzo de compresión hasta que se ha deformado por pandeo.

El efecto usual posterior de la rotura de la fábrica es la desaparición total de la poca protección del acero que pueda quedar y la degradación rápida de todo el conjunto. La descripción de las causas de la corrosión y más imágenes explicativas se exponen más adelante.

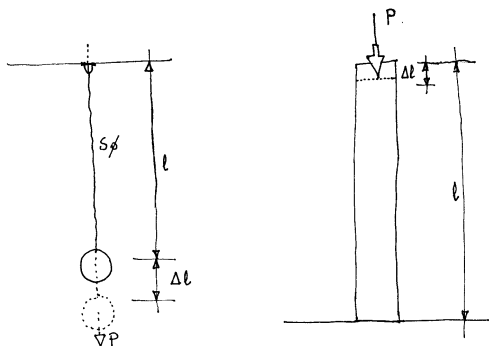
Fuerzas exteriores

Sin duda, esta es una de las causas de deformaciones permanentes más importante ya que actúa en cualquier lugar y en todos los elementos constructivos.

Tal como ya se ha comentado en I-2 todos los elementos empleados en la construcción son deformables en mayor o menor medida bajo el efecto de fuerzas, gravedad, viento o sismo, y, la mayoría de las veces, cuando cesa la fuerza que deforma el elemento, recupera la forma inicial ya que los materiales usuales son elásticos para las cargas normales.

Según eso, se podría pensar que estamos ante una deformación variable que depende de la presencia o no de los usuarios. Esto será cierto si estamos en una construcción ligera en la que el peso propio del edificio es muy pequeño con relación a las sobrecargas. Pero en la mayoría de los casos es al revés y el peso propio actúa como una causa de deformación permanente.

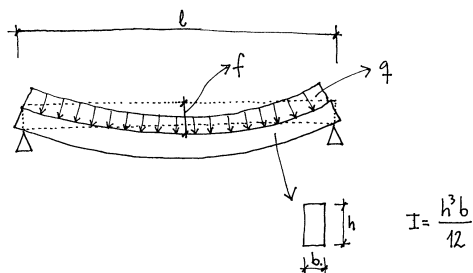
A lo dicho en I-2 es conveniente añadir ahora que la relación entre las fuerzas actuantes y las deformaciones producidas vienen reguladas por la llamada ley de Hooke, que para las compresiones o tracciones tiene la siguiente expresión: $\Delta l = P / S E$, que indica que el alargamiento o acortamiento de un elemento



traccionado o comprimido es directamente proporcional a la carga que actúa y a la longitud del elemento, e inversamente proporcional a la sección y a una característica del material, E, que se denomina módulo de Young, diferente para cada material según se puede observar en el cuadro. Los valores reales de los acortamientos o alargamientos son realmente pequeños e imperceptibles. Por ejemplo, un elemento de un metro de altura de una obra de fábrica normal ($E = 40.000 \text{ kg/cm}^2$) comprimida con una tensión de 20 kg/cm^2 se acorta $0,5 \text{ mm}$.

Material	módulo de Young (en kg/cm^2)
.....	
acero	2.100.000
hormigón	200.000 (aprox.)
madera	100.000-20.000
fábrica de ladrillo	100.000-20.000
.....	
(el único valor exacto es el del acero; los otros valores varían según sea la calidad general del material)	

Los elementos horizontales simplemente apoyados bajo cargas gravitatorias se deforman por flexión, y a lo explicado en I-2 se puede añadir que la relación entre la flecha y las características de la viga viene dada por una expresión algo más complicada que la anterior, pero



conceptualmente igual: $f = 5ql^4 / 384IE$ que indica que la flecha es directamente proporcional a la carga aplicada, a la cuarta potencia de la luz e inversamente proporcional al módulo de Young E, y al momento de inercia de la viga, que

depende de sus características geométricas, que en el caso de una con sección rectangular aparece en la figura.

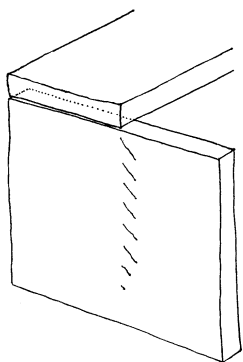
La combinatoria de casos es muy amplia, pero casi todos se pueden deducir a partir de la fórmulas anteriores comparando las deformaciones diferentes que tienen elementos contiguos porque son diferentes entre sí algunas de las variables, diferentes longitudes, diferentes cargas, diferentes luces, diferentes materiales y, en consecuencia, diferentes módulos de Young E .

Los ejemplos que siguen sólo pretenden aclarar esta idea y no ser una exposición sistemática de todos los casos posibles, para lo que se necesitarían varios capítulos como éste.

• **Acortamiento diferencial en elementos verticales**

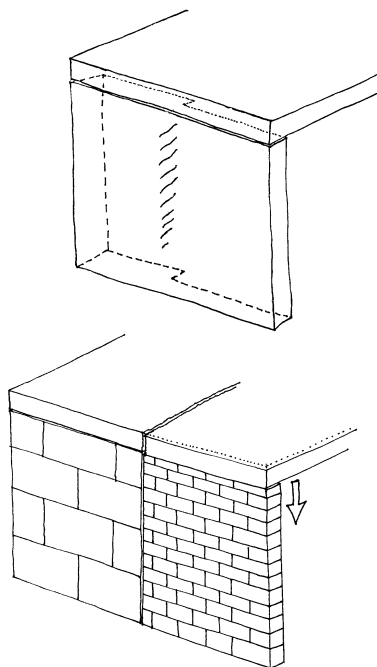
Los acortamientos de los elementos comprimidos no son visibles a simple vista. Pero sí pueden observarse sus efectos cuando son diferenciales.

Supongamos un muro de ladrillo muy cargado en su mitad izquierda. Debajo de esta carga, la mitad del muro se acortará aproximadamente un milímetro, por ejemplo, mientras que la parte sin carga quedará igual y se pro-



ducirá una fisura entre las dos paredes. En este caso las diferencia está en las cargas.

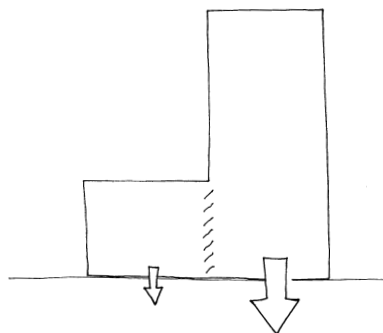
El efecto es el mismo si la carga es la misma, pero el muro tiene diferentes secciones, o es de diferentes materiales, uno mucho más rígido que el otro.



Son casos poco frecuentes y difíciles de observar. Lo contrario de los siguientes.

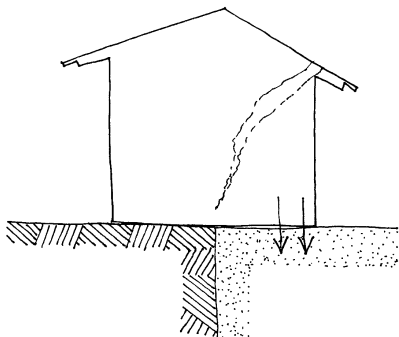
• **Asentamientos diferenciales del terreno**

De la misma manera se producen deformaciones (llamadas asentamientos) diferenciales en el terreno, que aunque se rigen por leyes más complicadas que la anterior, actúan de manera semejante; si un terreno está cargado con tensiones diferentes, se deformará en cantidades



diferentes y esto provocará una deformación del resto del edificio. Otra causa también frecuente es que el edificio esté asentado sobre

terrenos diferentes, uno menos deformable que el otro.

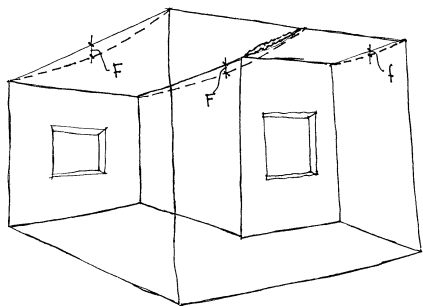


Todo esto se puede prever. Por ejemplo, en el primer caso, un edificio con dos partes diferentes, una muy alta y la otra baja, separándolas con una junta se habrá resuelto el problema. Pero en la mayoría de los casos, la solución pasa por el correcto diseño y dimensionamiento de las cimentaciones (II-3).

• Flechas excesivas por flexión

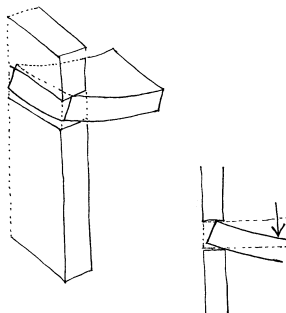
Los elementos del edificio en los que se pueden ver claramente estas deformaciones son los elementos horizontales que, como se deforman por flexión, si bien tienen unos acortamientos y alargamientos mínimos en su longitud, no es tan mínima la flecha que separa la forma final de la horizontal.

Un ejemplo puede observarse en la fisura que aparece en el techo de un local cuando dos vigas de igual canto contiguas tienen longitudes diferentes.

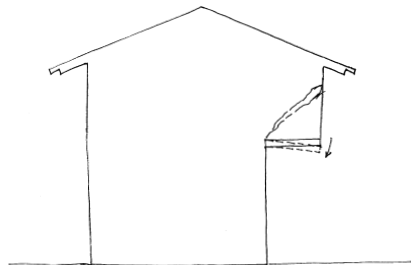


Los forjados de las últimas plantas de los edificios de muros también pueden producir fisuras en las fachadas que habitualmente se

suman a las de dilatación térmica de la cubierta o del mismo forjado.



El efecto más negativo se produce cuando los forjados flechan más de uno o dos centímetros si se apoyan sobre ellos fachadas o tabi-



ques que no pueden deformarse de igual manera y se rompen o quedan sin apoyo en el forjado. Además de la desagradable impresión, se produce la pérdida de la estanquidad al agua y al aire, con las correspondientes pérdidas de aislamiento acústico o visual en los tabiques.



Caso poco frecuente pero revelador en el que el tabique con el marco de la puerta se queda sin apoyarse en el forjado que ha flechado excesivamente.

La solución a estos problemas no es fácil y sólo tiene dos caminos en la fase de proyecto: uno, atacando las causas a través del forjado, otro, en los efectos a través de los elementos que entran en contacto con él. Si nos fijamos en la fórmula anterior veremos que la solución más rentable es reducir la luz ya que aparece a la cuarta potencia, lo que obliga a pensar en una organización espacial y una estructura portante con luces moderadas. Otra es aumentar la *I* (inercia) por medio del aumento del canto de las vigas, lo cual comporta aumento de peso y sus inconvenientes económicos. Los tabiques pueden resolver sus juntas de contacto con materiales más flexibles como el retacado superior con pasta de yeso. La solución óptima pasa por reunir todas estas soluciones parciales (II-8.1).

Vistas todas las causas de las deformaciones, pasemos a estudiar las degradaciones debidas a los cambios en la estructura físico-química.

CAMBIOS DE LA ESTRUCTURA FÍSICOQUÍMICA DEL MATERIAL

Causas químicas

En toda acción química sobre los materiales hay un factor decisivo a considerar: la presencia o no del agua, tal como ya se ha indicado en el inicio de este tema y en I-3. La inmensa mayoría de las reacciones químicas no se producen sin su presencia, que, recuérdese, puede ser en estado líquido en el exterior por escorrentía o capilaridad, en el interior por filtración o condensación, o en estado gaseoso disuelta en el aire.

El comportamiento de los materiales es diferente según sean no porosos, como los metales, o porosos, como el hormigón o la obra de fábrica, y en este caso, según tengan o no fisuras o grietas producidas por las deformaciones consideradas anteriormente.

En general, los metales, especialmente el acero, están afectados principalmente por la corrosión y los materiales porosos están más afectados por la acción de los ácidos, los álcalis y las sales solubles. Los materiales leñosos

están sometidos a la agresión de organismos vivos que combinan su acción erosiva directa con la de los productos químicos que segregan. En todos los casos la presencia del agua es decisiva.

Veamos cada uno de ellos. Al igual que ya se ha dicho antes, no se trata de exponer la totalidad de los casos posibles, sino de una muestra representativa formada por casos frecuentes.

Acción de ácidos y sales en la obra de fábrica

Los ácidos más comunes son los formados a partir del dióxido de carbono y del dióxido de azufre, presentes en atmósferas contaminadas como consecuencia de los gases provenientes del tráfico de vehículos o de la producción industrial. Sus efectos más graves se producen en determinadas piedras, areniscas y calizas,



Efectos de la contaminación ambiental sobre sillares de piedra caliza. Las diferentes intensidades se deben a diferencias en el origen de las piedras.

en las que ocasionan una disolución de los agentes cementantes y una degradación en forma de pérdidas de material, descostramientos, etc. Afecta especialmente a los edificios históricos, con piedras ya alteradas por su largo contacto con el aire que no resisten la nueva agresión propia de nuestra civilización.

En cualquier caso, si queremos hacer edificios durables con piedra en las fachadas se deben analizar los posibles efectos de la contaminación ambiental.

Los efectos de las sales solubles se concretan en las denominadas eflorescencias y afectan a los elementos de obra de fábrica de piedra o ladrillo, en contacto con el agua de lluvia o de capilaridad. Las eflorescencias no son más que depósitos de los cristales de las sales



Demostración clara de los efectos positivos de la protección de las fachadas por las cubiertas. En la parte no protegida, además de la humedad de la lluvia reciente, se advierten las manchas blanquecinas de las eflorescencias.

constituyentes de los materiales, ladrillos o morteros, que se disuelven en el agua de lluvia y se depositan en las superficies de los materiales cuando se evapora el agua.

Las sales pueden proceder de otro material contiguo al afectado, como las que proviniendo de los morteros se depositan en los ladrillos o al revés.

Además de afectar al aspecto de los edificios, pueden producir una degradación de los materiales, ya que la cristalización va acompañada de procesos físicos de expansión que pueden llegar a romper la estructura porosa superficial del material.

Si la cristalización se produce en su interior antes de llegar a su superficie, en cuyo caso se denominan criptoflorescencias, los efectos pueden ser más graves, ya que pueden provocar la caída de la porción de material que queda entre ellas y el exterior.

Deterioro de la madera

Además de las deformaciones tratadas anteriormente, la madera está sometida a una degradación debida a la acción de los denominados agentes bióticos u organismos vivos que tienen en la madera su espacio vital y su fuente de alimentación, y que están formados por dos grandes grupos: los hongos y los insectos.

De los primeros se han de destacar los que provocan la pudrición mediante enzimas capaces de destruir las componentes elementales del esqueleto leñoso. Para su supervivencia necesitan oxígeno gaseoso, y se desarrollan óptimamente si la temperatura es del orden de los 20 °C y la humedad en la madera de un 30 %. Si ésta es inferior al 20 % no pueden sobrevivir, lo cual lleva una vez más a la necesaria prevención en relación al agua.



En este caso, se trata de una pudrición debida a la humedad retenida en la madera por agua infiltrada por las deficiencias de la pintura como consecuencia de un mantenimiento inexistente.

La mayor efectividad preventiva se conseguirá utilizando madera bien seca, que no pueda estar afectada posteriormente por filtraciones o condensaciones, y que sea accesible al mantenimiento. Si no es así, es preferible aplicar un tratamiento protector que también habrá de volver a aplicarse al cabo de cierto tiempo.

Entre los insectos se han de destacar las carcomas y las termitas. Las dos especies atacan a la madera seca sin que ninguna medida preventiva de construcción pueda impedirlo. Su prevención se basa en la vigilancia durante el mantenimiento y la aplicación de procedimientos complejos.

Corrosión del acero

• Por oxidación

Los metales habitualmente utilizados en la edificación exceptuado el acero, es decir, el aluminio, el cobre y el cinc, cuando entran en contacto con la atmósfera provocan un variado conjunto de reacciones químicas que no producen ningún tipo de degradación, ya que los productos finales son óxidos que se depositan fuertemente en su superficie y los protegen de nuevas oxidaciones. Justo lo contrario de lo que pasa con el acero normal, en el que la oxidación provoca su corrosión.

El óxido férrico no forma ninguna película, sino que es una sustancia porosa y deleznable que ocupa un volumen mucho mayor que el original y que no protege en absoluto al acero sin oxidar. La oxidación total se produce tarde o temprano por el paso del tiempo. Si el acero está empotrado en obra, el aumento de volumen del óxido provoca las roturas por expansión citadas en el apartado anterior.

• Por acción electrolítica

El proceso que puede afectar a otros metales, y al acero, es la acción electrolítica.

La corrosión electrolítica se produce cuando dos metales de diferente potencial eléctrico se ponen en contacto en presencia de humedad que actúa como electrólito y permite que tenga lugar una corriente eléctrica por desplazamiento de electrones de una superficie (ánodo) a otra (cátodo). La corriente que se origina desde el ánodo provoca la lenta desaparición o corrosión de la zona anódica.

Se pueden dar dos tipos de situaciones que provocan este proceso: dos metales diferentes o un sólo metal. Este último es el caso del acero cuando una misma pieza tiene una zona húmeda y otra seca, ya que la corriente electrolítica se produce actuando la húmeda como ánodo, que acaba destruida por corrosión. Es el proceso que se produce en todo acero en contacto irregular con el agua, como, por ejemplo, la barandilla de un balcón o un anclaje empotrado en una fábrica de ladrillo porosa o poco protegida de la humedad del exterior.



Rotura de una pieza de la albardilla de un muro de cerca por corrosión de la parte de la pieza de acero empotrada en ella.

Como consecuencia de todo ello, es imprescindible proteger el acero que utilizemos en nuestros edificios. Los procedimientos son muy diversos y dependen del tipo de pieza o elemento de que se trate y del momento en que se puede realizar.

En el proceso de manufacturación, el más utilizado es el galvanizado, o revestimiento total de la pieza con una capa de cinc depositada mediante procedimientos electrolíticos. Las piezas requieren una última capa de protección o pintura. De este tipo son una gran cantidad de los elementos que se describen en el tomo III, paneles para cubiertas o fachadas, etc. En este caso no es conveniente someter a la pieza a ninguna manipulación posterior como doblado o corte, ya que perdería la protección justo en el corte o doblez.

Si el acero llega a la obra sin protección, es preciso dársela mediante varias capas de pintura protectora. La duración de esta capas es limitada y es preciso someterlas a decapado y reposición varias veces a lo largo de la vida del edificio, sobre todo si los elementos de acero están en contacto con el exterior. La accesibilidad de estos elementos pasa a ser, en consecuencia, un aspecto clave.

• *Por carbonatación del hormigón*

El fenómeno que se produce en el hormigón armado es algo diferente. En sus etapas iniciales, el hormigón que recubre las armaduras, si es compacto y sin fisuras, presenta unos altos contenidos de hidróxido cálcico que evita la formación de las corrientes electrolíticas en el acero, que se producirían si no fuera por ello, ya que la humedad del ambiente entra por los poros. Pero con el paso del tiempo se produce la denominada carbonatación, por la cual el hidróxido, al combinarse con el CO_2 del aire que penetra en el interior también a través de los poros del hormigón, se convierte en carbonato cálcico que ya no impide la formación de las corrientes electrolíticas. La presencia de humedad desencadena la corrosión de las armaduras y la destrucción del hormigón.



El proceso es claro, carbonatación del hormigón, corrosión y expansión del acero, y rotura final del hormigón.

La carbonatación es un proceso lento (1 cm cada diez años, más o menos según sea la porosidad) que afecta a todos los hormigones. Ahora bien, la corrosión sólo se produce en los hormigones que, además, están en contacto con la humedad, especialmente en los hormigones vistos en el exterior aunque no se mojen. El caso extremo se da si además por defecto de diseño retienen agua de lluvia por falta de escorrentía. En una situación normal puede empezar la corrosión de las armaduras al cabo de veinte o treinta años y al cabo de unos cuantos más la destrucción del hormigón.

La carbonatación del hormigón, fenómeno casi desconocido hasta hace pocos años, ha llevado a dejar de considerar al hormigón armado como un material casi perfecto como se pensó hasta bien entrado el siglo xx. Sin duda se seguirá utilizando, pero incluyendo todas las precauciones que eviten la corrosión de las armaduras tales como baja porosidad y alta resistencia, recubrimientos suficientes de las armaduras y protección del contacto con el exterior mediante revestimientos u otros procedimientos.

Si se desea que los edificios duren cien años, ya hace tiempo que acabó la época del hormigón visto.

Causas físicas

Las acciones causantes de degradación anteriores suponen un cambio en la estructura química. Las que se exponen en este apartado sólo afectan a las características físicas.

Disgregación

Si las sustancias contenidas en el interior del material experimentan un aumento de volumen con una fuerza de expansión suficientemente potente, puede producirse la destrucción física del material.

Ya hemos considerado en el apartado anterior dos casos, las eflorescencias y la corrosión, que tienen su origen en un cambio químico. Ahora hemos de considerar otro caso de origen totalmente físico: el efecto producido por el aumento de volumen que experimenta el

agua cuando pasa del estado líquido al sólido, es decir, cuando se forma el hielo. Se ha de recordar que este aumento es del orden del 10 % y, si se produce en el interior de un material poroso que no permite este aumento de volumen (porque tiene, por ejemplo, todos los poros llenos de agua), se puede llegar a la ruptura y disgregación del material afectado. Están afectados potencialmente por esta acción los materiales porosos en contacto con el exterior en cubiertas o fachadas (III-9 y III-7.2).

Erosión

Son pérdidas de material debidas a los efectos erosionantes de agentes tan diversos como el viento, el agua o los propios usuarios. Los dos primeros pueden afectar a materiales de fachadas con poca resistencia. Los segundos afectan sobre todo a los pavimentos (II-9.4).



El desgaste del pavimento denota las zonas prioritarias de circulación.

Cambios de aspecto

El último caso considerado es el que menos afecta a la estructura física de los materiales, pero tiene una notable influencia en la percepción estética de los edificios.

El agua de lluvia se escurre por las superficies de las fachadas, impulsada por la gravedad y el viento, de una manera no homogénea consecuencia de las formas salientes, entran-



Efectos del lavado desigual de las fachadas.

tes, etc. Si el material de la fachada es poroso, puede absorber las partículas atmosféricas y se ensucia. El agua limpiará de manera diferente las superficies y puede llegar a desfigurar totalmente la imagen inicial de la fachada (III-7.2).

LOS MÉTODOS DE PREVENCIÓN DE LA DEGRADACIÓN

El profesional de la arquitectura no sólo debe conocer las posibles causas de las degradaciones más importantes o frecuentes, sino que además, especialmente, qué hay que hacer para evitarlas. Ya se ha dicho al principio que el 40 % de los casos de degradación son debidos a errores de concepción y un 35 % a la puesta en obra.

En las líneas anteriores se han presentado sólo algunas de las prevenciones más habituales, y no se ha dado una visión sistemática de cómo es necesario proyectar o poner en obra para evitar la degradación. La razón se encuentra en la misma naturaleza compleja de las degradaciones, que exige que la prevención se haga, no causa a causa, sino desde los elementos del edificio en los que se concentra la conjunción de todas ellas, y por ello se tratará a lo largo de los tomos II y III.

La observación sistemática del comportamiento a largo plazo de los procedimientos constructivos y materiales habituales, directamente por cada profesional o mediante los estudios estadísticos elaborados por las compañías aseguradoras, es un método imprescindible para tomar las medidas preventivas de la degradación futura. Pero, ¿qué ocurre con las innovaciones?

Contrariamente a lo que sucede en los ámbitos tratados en los temas anteriores, si se aplica con rigor el método científico para resolver la prevención de la degradación, la innovación en el mundo de la edificación es muy lenta y costosa. La razón está en que mientras, por ejemplo, el comportamiento acústico de un elemento novedoso es perfectamente analizable, tener la certeza sobre si un nuevo procedimiento es realmente duradero sólo es posible si ha transcurrido por él un período de tiempo superior a una o dos décadas.

Para evitar tanta dilación, los laboratorios dedicados al desarrollo de nuevos productos de construcción se han dedicado a elaborar métodos de ensayo que reproducen a mayor velocidad las acciones que degradan los materiales, como los ciclos de temperatura, humedad, sequedad, etc. Pero la realidad siempre es más compleja e inexorable de lo que podamos reproducir en un laboratorio. Muchos materiales avalados por laboratorios, y a veces también por una fe ciega en el progreso técnico, han sufrido envejecimientos prematuros graves, como el citado anteriormente del hormigón armado. Los estudios más precisos no pueden prever en su totalidad la complejidad real del comportamiento a largo plazo de materiales y elementos.

En el estado actual de los conocimientos, la aplicación rigurosa del método científico sigue requiriendo la acumulación sistemática de los datos recogidos sobre los propios edificios a lo largo de su larga vida y la elaboración de conclusiones para el diseño de los nuevos.

En realidad, éste ha sido el método habitual aplicado por los constructores en los siglos pasados. Los procedimientos constructivos tradicionales habituales de un lugar se pueden considerar como el resultado de una selección de sólo los que han demostrado a lo largo de años un comportamiento final adecuado.

Pero, a pesar de todo, la aceleración del ritmo de los cambios que caracteriza la modernidad que se inicia en el siglo xx no permite un método tan lento. La solución pasa, finalmente, por la prudente conjunción de todos los métodos disponibles, la experiencia real a largo plazo, la experimentación rápida en el laboratorio y la aplicación de todos los conocimientos rigurosos disponibles, sin caer nunca en excesos de optimismo tecnológico.

Junto a los conocimientos de química y física que nos permiten predecir muchos comportamientos y a los datos suministrados por los laboratorios, es preciso estar muy atentos a las estadísticas que proporcionan las entidades citadas sobre las degradaciones más usuales en nuestros edificios, y sobre todo es preciso incrementar nuestra capacidad personal de observación sobre los edificios existentes. Su estado es el resultado de la más completa y sistemática experimentación posible: el paso real del tiempo sobre edificios reales.

Una auténtica actitud científica de los profesionales de la arquitectura obliga a visitar periódicamente sus edificios para comprobar el estado real de sus diseños iniciales, que no son más que hipótesis razonables sobre el comportamiento de las personas y el edificio que se han de contrastar. La acumulación sistemática de datos sobre el comportamiento a largo plazo de la obra propia también es una potente fuente de conocimiento.

CAPÍTULO IV. Producción

El principio de eficiencia productiva

A lo largo de los tres capítulos anteriores se han explicado las relaciones que nos permiten pasar de los objetivos cuantificables a los requisitos y exigencias que afectan a los elementos en sus formas y materiales. También se ha visto cómo algunas soluciones concretas y reales dan satisfacción a las exigencias por medio de unas prestaciones que son consecuencia de las formas y los materiales con los que están realizados.

En este cuarto capítulo se exponen las reglas que rigen el proceso de conversión de los materiales existentes en la naturaleza en esas soluciones concretas dotadas de las prestaciones deseadas.

En la fase imaginativa del construir arquitectónico, alguien, arquitecto o persona que actúa como arquitecto, ha de elaborar la idea del edificio o el elemento urbano que se ha de construir, de manera que sea capaz de cumplir, potencialmente, todos los objetivos que justifiquen su existencia. Y lo ha de hacer definiendo además cómo esos objetivos se concretan en requisitos, éstos en exigencias, y cómo las soluciones propuestas les dan cumplimiento con sus prestaciones.

En la fase productiva, un auténtico ejército de máquinas de diferentes tipos y de personas de diferentes especialidades del conocimiento y rangos de habilidad, habrá de realizar multitud de acciones sobre los materiales existentes en la naturaleza, cuyo resultado final será la materialización de las soluciones concretas que conformarán aquel edificio o elemento urbano, cuyas prestaciones satisfarán, o no, las exigencias.

No se puede hablar de un único procedimiento productivo, sino que es un proceso complejo que utiliza procedimientos de muy diferente tipo según los materiales que trabajan y que puede variar de un edificio a otro.

Pero es común a todos los procedimientos estar sometidos a las leyes de la economía, es decir, alcanzar sus objetivos en grado máximo utilizando el mínimo de recursos, es decir, la eficiencia de la producción, común a cualquier actividad humana, también es un principio del construir arquitectónico en su fase productiva.

Es imposible entender nada de lo que ocurre en una fábrica de materiales o en una obra si no se considera la presencia agobiante del principio de eficiencia. Lo cual no niega que pueda estar ausente en bastantes ocasiones. Aunque, si es así, su ausencia comporta, tarde o temprano, la desaparición de la unidad productiva, sea una fábrica o una empresa constructora. Las leyes del mercado son implacables.

El estudio desarrollado en este cuarto capítulo busca ordenar el *mare magnum* de todas las acciones del ejército de máquinas y operarios, con tal de definir las claves que permiten su comprensión global y la de su implacable incidencia en el resultado final de las obras de arquitectura en todos sus niveles, desde la utilidad e integridad hasta la conveniencia estética.

Se inicia con una primera visión general que abarca la clarificación del concepto de técnica y los conceptos básicos comunes a todas las técnicas que permiten producir edificios, que después se desarrollan según sean técnicas de fabricación de los materiales o de la construcción de edificios.

TEMA 12. Técnicas del construir arquitectónico

EL CONCEPTO DE TÉCNICA APLICADO AL CONSTRUIR ARQUITECTÓNICO

Precisiones terminológicas

Valoración interna y externa de las técnicas

VALORACIÓN EXTERNA SEGÚN SUS IMPLICACIONES MEDIOAMBIENTALES

VALORACIÓN SEGÚN EL CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS PROPIOS

La fase imaginativa

La fase productiva

Los tres momentos de la fase productiva

El control interno de la eficiencia

CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE PRODUCCIÓN

EL CONCEPTO DE TÉCNICA APLICADO AL CONSTRUIR ARQUITECTÓNICO

Precisiones terminológicas

Los vocablos “técnica” y “tecnología” tienen en la actualidad diversos significados que son utilizados con diferentes criterios sin que nunca se aclare cuáles son en cada caso. El resultado no puede ser otro que la confusión. Para evitarla, en este texto se han utilizado el menor número de veces sustituyéndolos, siempre que es posible, por sinónimos de menor valor polisémico. En los temas de este capítulo sobre los medios de producción su uso es muy frecuente y es imprescindible, en consecuencia, definir con claridad el sentido que aquí se les da, que no es otro que su acepción original.

En el ámbito de la producción de objetos físicos, la técnica es el conjunto de procedimientos elaborados intencionalmente por el hombre que permiten convertir materiales existentes en el medio natural en artefactos útiles a la vida humana, incluidos los estrictamente artísticos. Ésta es la acepción original.

No obstante, en el mundo de la arquitectura está muy extendido otro significado muy diferente, y mucho menos preciso, que opone

técnica a arte (y a arquitectura) ya que asocia la técnica al conjunto de saberes susceptibles de ser cuantificados, con lo que se confunden los propiamente técnicos con los que se derivan de las denominadas aquí razones prácticas. Una valoración excesiva de la componente poética del construir puede llevar a un desprecio de todo conocimiento cuantificable tanto técnico como el de las razones prácticas, con efectos nada positivos para nadie.

Las raíces de esa confusión tienen su origen, en parte, en los episodios históricos señalados en la Presentación y su estudio queda fuera del alcance de este manual.

Aquí, el significado adoptado para el término “técnica” es el original y el conjunto de saberes cuantificables se divide en los de la producción, o técnicos propiamente dichos, o los relacionados con las razones prácticas.

Precisando algo más, podemos decir que una técnica es un conjunto o sistema de acciones humanas intencionalmente orientado a la transformación de materiales en objetos concretos, con tal de conseguir de manera eficiente un resultado valioso, sin excluir, si es el caso, los valores del arte. El significado de eficiencia es el de eficacia en la consecución de los objetivos al mínimo costo en un sentido amplio y no sólo monetario.

La eficiencia de esas acciones requiere que estén guiadas por un determinado conocimiento, que podemos denominar conocimiento técnico, y que puede ser consecuencia de dos tipos de fuentes y sus posibles y numerosas combinaciones. Por un lado la simple experiencia acumulada o conocimiento empírico y, por otro, el conocimiento basado en el método científico.

Históricamente, antes de la aparición de éste, el construir arquitectónico estaba regido estrictamente por el conocimiento empírico, que no era poco. Pero en el momento en que las matemáticas pudieron modelizar el comportamiento de una viga, la física la transmisión del calor, o la química el comportamiento de los materiales, esa experiencia acumulada quedó para siempre unida a las aportaciones del conocimiento científico; éste cada vez está más presente en la actividad constructora.

Sin embargo, no es fácil que una actividad tan vieja y heterogénea como el construir arquitectónico pueda olvidar y dejar de lado el tipo de conocimiento que la guió los muchos siglos anteriores al xx, es decir, el conocimiento empírico. En realidad, en bastantes aspectos, el conocimiento aplicado es una mezcla de dos orígenes, la ciencia y la experiencia directa, con mayor peso la primera a medida que avanza la historia, pero sin poder desbancar del todo a la segunda.

Siguiendo propuestas de autores cualificados, podemos utilizar la palabra tecnología para definir la técnica que se vale de ese conocimiento científico. Sin embargo, la palabra tecnología también significa estudio de las técnicas, tanto si son científicas como no, o también el conjunto de todas las técnicas, o las técnicas industriales, lo cual puede producir no pocas confusiones. Para evitarlas no se usa en este libro el vocablo “tecnología” y a las acciones intencionales que permiten producir edificios las denominaremos técnicas, dando por supuesto que siempre hacen uso en mayor o menor medida del conocimiento científico.

Hechas estas puntualizaciones podemos afirmar que el construir arquitectónico en su conjunto se puede entender como una técnica global que requiere del concurso de diferentes

técnicas parciales cuya finalidad es conseguir la realización de unos artefactos, los edificios, valiosos según los juicios de valor de la sociedad, y de la manera más eficiente posible. Valor y evaluación de la eficiencia pasan a ser cuestiones claves para la aplicación correcta de la técnica en el conjunto o de cada una de las técnicas particulares.

Valoración interna y externa de las técnicas

Una actividad técnica productiva concreta se puede valorar desde dos puntos de vista, interno y externo. Se procede a la evaluación interna cuando los criterios que se utilizan para evaluarla toman en consideración factores relacionados con la eficiencia del proceso en sí mismo. Por contra, hablamos de evaluación externa cuando se utilizan criterios relacionados con la utilidad o el valor que el producto final tiene para el usuario o la sociedad en su conjunto.

Son dos tipos de evaluación que intervienen generalmente mezclados, ya que cualquier diseño u objeto tiene que valorarse por criterios de utilidad final social, y toda valoración acerca de la utilidad de una técnica presupone por otra parte que ésta responde a un cierto nivel de eficiencia interno.

En la actividad cotidiana de los profesionales de la arquitectura se puede dar una tendencia al ensimismamiento de las diferentes técnicas incluyendo sólo valoraciones de tipo interno. Pero es importante no dejar de tener presente la concatenación entre la eficiencia interna de las técnicas y la utilidad final del producto, el edificio, de manera que si ésta no existe, aquélla no tiene ningún sentido. Y éste es precisamente, uno de los objetivos claves de este texto, establecer claramente la diferencia entre ambos niveles, pero destacando todo aquello que los une. Los criterios de valoración externa que aquí se proponen son, obviamente, los principios que hemos establecido, adecuación del espacio y del ambiente, integridad y conveniencia estética.

Pero, por otro lado, la reciente sensibilidad de la sociedad con relación a las posibilidades del desarrollo sostenible, somete al conjunto de todas las técnicas, incluidas desde hace poco tiempo las del construir arquitectónico, a otro

tipo de valoración externa con criterios que no se basan en la finalidad de las técnicas en sí mismas, sino en sus posibles repercusiones negativas en el medio ambiente considerado en su dimensión mundial. Lo reciente de esta preocupación en el ámbito edificatorio explica que no tengamos un cuerpo de doctrina elaborado y que no podamos pasar de las consideraciones generales que se exponen en el apartado siguiente, que sólo tiene como finalidad concienciar al lector para que esté atento sobre los cambios que, sin duda, se producirán en los próximos años. Hechas esas consideraciones, entraremos en la valoración habitual de las técnicas según sus propios objetivos.

VALORACIÓN EXTERNA SEGÚN SUS IMPLICACIONES MEDIOAMBIENTALES

Cualquiera de las industrias que producen los materiales de construcción consumen combustible y crean contaminación. Pero también los propios edificios, cuando acaban su ciclo vital, suponen un residuo con mayor o menor dificultad de asimilación por el medio ecológico según sean sus materiales. Si añadimos lo dicho en el capítulo II sobre consumo energético tendremos el panorama completo de las implicaciones medioambientales del hecho edificatorio que se concreta, pues, en tres fases fundamentales, producción, uso y demolición.

En la actualidad la fase de uso es, con mucha diferencia, la que tiene mayor incidencia. Sin embargo, reducir los efectos contaminantes de la producción y la utilización de materiales de construcción reciclables al final de su ciclo vital, son dos vectores de evolución de las técnicas del construir, cuya influencia, ahora incipiente, será decisiva en las próximas décadas, y con mayor fuerza si se confirmara la reducción del ciclo construcción-demolición al que se hace referencia en I-11. Desde este punto de vista, como también se indica en dicho tema, es más conveniente alargar la vida al máximo de los edificios, construyéndolos más durables u otorgando mucha más prioridad a la rehabilitación frente a la sustitución.

Estamos lejos de llegar a tener un cuerpo completo de criterios de valoración, debido

que no tenemos todavía a punto ni siquiera el instrumento que nos permita distinguir y seleccionar los materiales y técnicas de puesta en obra según sea su impacto medioambiental. En la actualidad, sólo se han desarrollado instrumentos con igual fin en otros ámbitos, como en la producción industrial en general o la construcción de grandes obras públicas, que son poco adaptables al nuestro. Sin embargo, sí que existe uno, proveniente del campo de la química, que ofrece mayores posibilidades, el ACV o Análisis de Ciclo Vital.

El ACV analiza sistemáticamente el impacto ambiental, incluyendo los recursos energéticos empleados, que ocasionan los productos en todo su ciclo de vida desde la extracción de las materias primas, su fabricación, transporte, puesta en obra, uso y eliminación final. Los cuatro primeros puntos son los que afectan a este capítulo IV sobre técnicas; el quinto, el uso, está en relación con lo dicho en el capítulo II sobre el consumo energético para la comodidad térmica (I-5) e iluminación (I-5), y sobre contaminación (I-6); sobre la eliminación final, recuérdese el comentario anterior sobre I-11. Todo el ámbito del construir arquitectónico está implicado claramente en el porvenir medioambiental.

La valoración del impacto se ha de hacer completa sobre la suma de todas las fases. No es suficiente que un material produzca poca contaminación en su fabricación y uso, si luego, finalizado su ciclo vital, es un deshecho no reciclable o no asimilable por el entorno ecológico.

Son evidentes las dificultades que se presentan para desarrollar métodos que permitan comparar las implicaciones del ciclo vital completo de los productos realizados con técnicas tan diferentes, como, por ejemplo, la construcción de estructuras con hormigón, con acero o con ladrillo, o los aislamientos térmicos con poliestireno expandido, con lana de vidrio o con bloques de cerámica aligerada. El método del ACV, a pesar de ser el más adaptado a la edificación, no ha alcanzado todavía un grado de objetividad suficiente como para tomar decisiones sobre un procedimiento de construcción. Sin embargo, en pocos años, se convertirá en una herramienta potente que nos permitirá valorar desde fuera de ellas las técnicas

edificatorias según sea su impacto ambiental. El lector deberá permanecer atento.

En las líneas que siguen nos vamos a limitar a la valoración externa basada en la finalidad básica de los edificios, que, como se comprueba en el capítulo II, también incluye desde hace ya bastantes años las consideraciones medioambientales derivadas del uso del edificio.

VALORACIÓN SEGÚN EL CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS PROPIOS

La fase imaginativa

Mediante los conocimientos expuestos en los temas anteriores de este volumen, 1 a 11, los temas 15 y 16, y los tomos II y III (es decir, toda la obra excepto los tres temas de este capítulo) es posible realizar juicios que nos permiten valorar con bastante exactitud si la idea plasmada en los documentos generados en la fase imaginativa es potencialmente capaz de alcanzar los objetivos previstos. Podemos valorar así la eficiencia técnica de la imaginación del diseñador del edificio.

Los juicios de valor están basados en un conocimiento regido principalmente por los métodos científicos. Todas las ramas de la ciencia han contribuido de forma decisiva al conocimiento objetivo y riguroso de dos aspectos claves de la fase imaginativa:

- la definición exacta e inequívoca de aquello que queremos conseguir, los objetivos, es decir, la adecuación del espacio y del ambiente, la integridad de todo y todos, y la conveniencia estética, y,
- cómo, mediante determinados materiales organizados entre sí para conseguir las formas de los elementos y el edificio, podemos llegar a alcanzar esos objetivos, si se realiza correctamente lo que hemos imaginado.

Como ya se ha indicado, este capítulo IV estudia las técnicas de la fase productiva que permiten esa realización conjuntamente con los criterios de valoración interna de su eficiencia. En esta fase dominan las acciones de transformación de materiales concretos, que requieren conocimientos bien diferentes a los de la actividad de imaginar.

La fase productiva

Los tres momentos de la fase productiva

La fase productiva a su vez se compone de tres momentos en los que se desarrollan acciones también de muy diferente entidad en cuanto a los objetivos y sus métodos:

- la extracción de materiales de su estado natural,
- la primera conformación de los materiales en centros de producción fijos,
- la segunda conformación del edificio en su lugar definitivo.

Las dos primeras son actividades comunes a cualquier proceso de producción de artefactos. La tercera sólo es compartida por la construcción de obras públicas.

La primera abarca técnicas tan diversas como la extracción de piedras en las canteras, la madera en los bosques o los metales en las minas. No se desarrolla en este texto, que se centra en las dos siguientes.

La segunda actividad es la primera conformación que se produce en los materiales naturales con tal de llegar a lo que habitualmente se denominan “los materiales de construcción” o también productos manufacturados. Se desarrolla en lugares permanentes, factorías, fábricas o talleres.

La tercera actividad productiva se desarrolla a partir de los materiales de construcción y el lugar varía según la ubicación del edificio, ya que éste es el punto final. Corresponde al sentido original del vocablo “construcción”.

En general, con la producción en factoría o fábrica, se busca suministrar materiales que se pueden utilizar en cualquier edificio; por ejemplo, se pueden fabricar ladrillos o vigas de hormigón sin que se sepa para qué edificio será. Por contra, en la producción in situ, sólo se produce para un edificio concreto.

El conocimiento que se aplica a estas fases es de diferente signo que el de la fase imaginativa, ya que ordena acciones que transforman los materiales, pero a su vez es diferente en cada una de las tres fases. En la producción en factorías o fábricas se pueden aplicar con mayor facilidad el conocimiento científico que

en la producción in situ. Y también es diferente según el procedimiento de construir que se trate. Los más antiguos, la albañilería, por ejemplo, siguen basándose en parte en el conocimiento empírico.

Pero que sean actividades diferentes que se desarrollan en momentos diferentes no debe llevar a establecer criterios de valoración diferentes para cada uno de ellos, ya que los resultados finales están condicionados por el conjunto de todas.

Por otra parte, la frontera entre el segundo y tercer momento no es exacta, no está siempre situada en el mismo lugar, varía de un edificio a otro y dentro del propio edificio según sean los materiales que utilicemos.

De manera que es conveniente mantener una visión global de todo el proceso que abarca desde la extracción en el mundo natural hasta la finalización del edificio.

El objetivo de cualquier fase de los procesos de producción es modificar los valores de algunas de las propiedades (debidas a su estructura físicoquímica o a su forma) que caracterizan los materiales hasta conseguir los de las prestaciones exigidas y de los objetivos finales.

La valoración interna de las técnicas de fabricación de los materiales deberá valorar si los procedimientos permiten alcanzar las características buscadas. La valoración interna de los procesos de producción in situ deberá averiguar si los elementos y subsistemas son capaces de alcanzar las prestaciones para cumplir las exigencias.

El control interno de la eficiencia

Por calidad de un material de construcción o de un elemento del edificio ya acabado, se entiende el conjunto de valores correspondientes a las características relevantes según sea su función en el conjunto del edificio, para obtener los objetivos globales. Durante el proceso de producción es imprescindible saber fehacientemente si se alcanzan o no todas esas características. La práctica habitual del control de los valores de cada una de las propiedades se ordena bajo el concepto de control de calidad.

Cada uno de los diferentes momentos y subfases del proceso productivo ha de organizar sus procedimientos de medición de esos valores relevantes, como procedimiento de control de la eficiencia interna de cada uno de los pasos dados.

En general, existe un control de fabricación y un control de recepción. El que compra un material para someterlo a procesos de cambio, por ejemplo, el fabricante de ladrillos que compra una determinada arcilla ha de tener la seguridad de que ésta responde a las características que él desea, y debe realizar una medición de esas características o propiedades, mediante un control de recepción.

A su vez, este mismo fabricante, para asegurar la calidad de su producto, habrá de hacer un control sobre las características relevantes de los ladrillos que ha fabricado, con tal de poder asegurar al posible comprador que puede fiarse de su producto. El comprador, habitualmente el constructor, ayudado por los técnicos facultativos, realiza el control de recepción volviendo a medir las variables relevantes de los ladrillos que compra, si bien existen procedimientos que evitan el control a partir de garantías de calidad generales.

Pero, además, antes de entregar el edificio al promotor o propietario, habrá de realizarse un control de calidad del elemento ya acabado, que dependerá del tipo de variables a medir. Se puede hacer de diferentes maneras, sobre los materiales y las formas, o directamente sobre las prestaciones. Por ejemplo, en el aislamiento acústico el control más eficaz es el que mide directamente la prestación final. Otras veces esta medición es difícil y sólo se puede efectuar el control inicial del material, como ocurre, por ejemplo, con el aislamiento térmico. Su control se basa en comprobar que el elemento constructivo está correctamente realizado según los planos y los materiales aislantes han cumplido los controles de recepción.

En realidad, en pocos casos es posible realizar un control de la prestación. Con relación a la capacidad portante para saber si un pilar es capaz de resistir cuarenta toneladas, no podemos someterlo a esa prueba. En este caso hay que basarse en el control de las características formales (dimensiones, verticalidad), y del control de recepción del material

hormigón, y del efectuado durante su proceso de puesta en obra.

La normativa sobre la construcción de edificios establece los diferentes valores que abarcan desde las prestaciones finales hasta las mediciones de la eficiencia interna de las operaciones de fabricación. La normativa que afecta a la construcción de edificios es el ya citado CTE. Las normativas que afectan a los procesos industriales, sean o no de elementos de construcción, se denominan Una Norma Española, UNE. El CTE hace constantes referencias a estas normas.

CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE PRODUCCIÓN

Es necesario introducir algún criterio clasificador que ordene y haga más comprensible el variopinto y diverso conjunto de las técnicas que se nos presentan a lo largo de todo el proceso del construir arquitectónico, desde sus fases iniciales a las de los más exquisitos acabados.

Históricamente, el método de clasificación se ha derivado de los diferentes materiales. Existen productores de materiales cerámicos, o de cementos o de derivados del hormigón en forma de prefabricados, los prefabricados de escayola, o los que trabajan la piedra o la madera. De hecho, los propios gremios, tanto en la fabricación como en la puesta en obra, están relacionados con el material, tales como albañiles, yeseros, carpinteros, plomeros, etc.

Pero hacer una clasificación por extensión, en este caso no es rentable dada la variedad de los casos. Es preciso definir un método más sintético.

En una primera aproximación, es razonable dividir las técnicas entre las que son necesarias para fabricar los materiales de construcción y las de puesta en obra. De hecho, ésta es la que se utiliza para definir los dos temas que siguen a estas líneas. Sin embargo, es importante destacar la cantidad de puntos comunes que existe entre ambas y la diferente situación de la frontera entre una fase y la siguiente, según sean los materiales utilizados y el grado de industrialización general del país donde se realizan los edificios.

Existen técnicas como la del hormigón o la del yeso, que basándose en los mismos procesos de producción, pueden realizar productos prefabricados y productos in situ, siendo las técnicas similares en sí mismas. Lo que cambia es que en la primera, el objeto se hace fuera del edificio y hay que transportarlo hasta él, y en el segundo, el objeto se hace en el edificio.

Es conveniente, en consecuencia, establecer procedimientos de clasificación que destaquen las cuestiones comunes a ambas fases, y a su vez dejen claras las diferentes y pongan cierto orden en la complejidad interna de todas ellas.

Las clasificaciones adoptadas aquí son dos, una para cada fase del proceso productivo, con un punto de contacto precisamente en el paso de una fase a la otra, es decir, cuando llegan los materiales a la obra. Ambas se basan en que las técnicas de producción siempre están organizadas para la consecución de los dos objetivos ya citados: introducir cambios favorables en las propiedades intrínsecas del material a través de cambios en sus estructuras fisicoquímicas, y cambios favorables en sus propiedades formales o geométricas. Y éstos son los que nos dan la clave.

Los materiales, cuando llegan a la obra, se pueden clasificar en dos grandes grupos básicos: los que ya tienen forma propia o conformados y los que no o amorfos. Entre éstos tenemos los que llegan en forma de polvo, pastas o líquidos, como cemento, yeso, pinturas, etc., y entre los primeros todos los demás, ladrillos, tejas, etc.

Los procesos de fabricación o los de puesta en obra de cada uno de los dos grupos son muy diferentes. Las dos clasificaciones tienen este punto en común, ambas tienen una primera división entre las técnicas para producir o poner en obra, respectivamente, los amorfos o los conformados.

Veamos ahora cada una de ellas por separado.

Los procesos de fabricación de los materiales amorfos, salvo alguna excepción como el machaqueo de la grava o la extracción de la arena, introducen cambios importantes en la estructura fisicoquímica que se acaban de completar durante los procesos de puesta en obra.

Los procesos de fabricación de los conformados se pueden dividir en:

- los que sólo varían la forma,
- los que varían forma y material.

En el primer grupo se encuentran los que permiten la utilización de materiales en estado casi natural en los edificios, como la piedra y la madera. Los del segundo son consecuencia de procesos en los que los productos finales no tienen nada que recuerde su origen.

En el próximo tema 13 de este volumen se estudian con más detalle.

El estudio de las técnicas de puesta en obra, que se desarrolla en el tema 14, se facilita enormemente si se introduce además una nueva subdivisión de los materiales conformados en pequeños elementos, semiproductos y componentes.

Los materiales más tradicionales, los ladrillos, los sillares, los sillarejos, podemos denominarlos pequeños elementos, a pesar de la disparidad de sus dimensiones, en contraposición con los que veremos después, ya que se pueden colocar a mano, sin que el operario tenga que hacer servir herramientas de levantamiento o grúas. Es importante resaltar que, además, el operario puede introducir variaciones de la forma mediante el corte, por ejemplo, reducir los ladrillos a la mitad; es decir, su forma puede no ser la definitiva.

En el otro extremo encontramos los llamados componentes, que llegan a la obra con una forma definitiva que no permite ningún cambio. Pueden ser pequeños, como, por ejemplo, un lavabo, o bien de grandes dimensiones, como un panel de hormigón armado prefabricado. En este caso suelen ser muy pesados y no se pueden mover sin la ayuda de un medio auxiliar como una grúa, por ejemplo.

Entre estos dos grupos tenemos los llamados semiproductos. Habitualmente son de gran dimensión, pero no demasiado pesados, de manera que se pueden manipular con facilidad y, además, permiten una elaboración en la obra de manera que su forma puede cambiar mediante el corte. Son ejemplos de ello los paneles de cartón yeso, los tableros aglomerados de madera o las telas asfálticas.

Como se verá, esta clasificación es notablemente rentable, ya que no solamente nos

permite entender los procesos de puesta en obra, e incluso los de fabricación, sino que permite realizar las tipologías de los propios elementos constructivos, como queda comprobado en la segunda parte de esta obra, y llega incluso a ser útil a la hora de ordenar el inaprensible campo de la conveniencia estética, tal como se puede comprobar en el tema 15.

En función de todo lo dicho se organizan los dos siguientes temas.

TEMA 13. La conformación de los materiales

CLASIFICACIÓN BÁSICA DE LOS PROCESOS DE LA PRIMERA CONFORMACIÓN

Procesos de producción de materiales amorfos

Procesos de producción de materiales conformados

Obtención de la forma sin cambios en el material

Obtención de la forma con cambios en el material

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS PROCESOS DE LA PRIMERA CONFORMACIÓN

ESTUDIO DE CASOS USUALES

Producción de amorfos

Conglomerantes. Yeso. Cemento portland

Hormigón

Producción de conformados sin cambio en el material

Pequeños elementos de piedra natural

Productos de madera

Producción de conformados con cambios en el material

Pequeños elementos de cerámica

Elementos de mortero u hormigón

Productos de acero

Los dos temas siguientes tienen una estructura similar. Una primera parte genérica en la que se exponen las características básicas de las técnicas de producción de materiales o de puesta en obra (aunque no de manera exhaustiva, dada su gran variedad) y una segunda en la que se repasan con algo más de detalle las técnicas más usuales. El objetivo de ambos temas es exponer las claves que permiten entender, en sus aspectos esenciales, la mayoría de las técnicas sin necesidad de verlas absolutamente todas, lo cual requeriría mucha más extensión de la disponible.

CLASIFICACIÓN BÁSICA DE LOS PROCESOS DE LA PRIMERA CONFORMACIÓN

Procesos de producción de materiales amorfos

Tal como se han definido en el tema anterior, los materiales amorfos son los que llegan a las

obras de construcción de los edificios sin una forma propia, sino con la del recipiente que los contiene.

Pueden ser polvos, pastas o líquidos, tales como los conglomerantes, cemento portland, cal, yeso, los áridos, arena, grava, las mezclas en las que se combinan todos los anteriores formando morteros u hormigones, y toda una gama extensa de productos industriales de componente fuertemente química, tales como son las pinturas, las pastas para sellado, etc.

Dejando de lado los productos de la industria química por su complejidad, nos centraremos en los más usuales, los conglomerantes y las pastas.

La producción de conglomerantes conlleva el siguiente proceso:

- la extracción de las rocas de las cuales derivan, tales como la piedra de yeso, la piedra calcárea con menor o mayor contenido de arcilla,
- una cocción mediante la cual se provoca

una variación de la estructura fisicoquímica, a la que sigue,

- un machaqueo hasta la pulverización.

En el proceso de puesta en obra posterior, esta nueva estructura fisicoquímica habrá de sufrir un nuevo cambio con tal de conseguir las propiedades intrínsecas definitivas de consistencia, rigidez y resistencia, tal como veremos en el tema siguiente. Tanto en el caso del yeso como el de la cal son prácticamente las reacciones fisicoquímicas inversas a las que se han producido en la cocción, y consiguen que la forma final de la obra tenga las propiedades naturales originales, el yeso rápidamente y la cal al cabo de un cierto tiempo. En el cemento portland son algo más complejas.

En las centrales hormigoneras, con el cemento portland y los áridos y el agua correspondientes se produce hormigón fresco, que ha de llegar a las obras en camiones hormigonera en un plazo corto de tiempo, como material amorfo, y que requerirá unos procesos de puesta en obra derivados de ese estado.

Dentro de los amorfos se encuentran también los que no sufren ningún tipo de transformación más que el transporte, tales como las arenas y gravas de los ríos e incluso el agua, que sin duda es un material de construcción absolutamente imprescindible.

Procesos de producción de materiales conformados

En contraste con la producción de amorfos, en la que no existe ninguna acción para obtener una forma que no sea reducir el producto a polvo, pasta o líquido, cuando el material es conformado, la obtención de esa forma final (pequeño elemento, componente o semiproducto) pasa a ser uno de los objetivos prioritarios del fabricante, al tiempo de conseguir los cambios en las estructuras fisicoquímicas.

Pueden considerarse dos grandes grupos de métodos de producción, aquellos en que las estructuras fisicoquímicas naturales prácticamente no sufren ningún cambio y los que, por el contrario, sí lo sufren.

Obtención de la forma sin cambios en el material

Si sólo introducimos variaciones en la forma, el material llegará a la obra en su estado natural, ya que no habrá experimentado apenas ningún cambio en sus propiedades intrínsecas. Es el caso de la piedra o la madera, dos materiales que suponen una presencia de la naturaleza en los edificios.

En estos casos, el material en sí mismo, es decir en su estructura fisicoquímica, prácticamente no está sometido a ningún cambio excepto la pérdida de humedad que pueda tener. Se aprovechan las propiedades intrínsecas del material en su estado natural, densidad, resistencias mecánicas, etc., que son consecuencia del proceso de producción desarrollado por la naturaleza, hace millones de años en el caso de la piedra o sólo hace unos pocos en el de la madera. Lo cual, obviamente, no exime de que su utilización como materiales de construcción requiera un conocimiento exhaustivo de esas propiedades, de sus posibles defectos y la mejora de aspectos que sean fácilmente mejorables, como el contenido de humedad. Los cambios se harán sólo sobre la forma, pero siempre buscando sacar el máximo provecho a las propiedades intrínsecas.

El procedimiento básico para la obtención de la forma es el aserrado.

Pero la mayoría de las transformaciones hechas en las factorías o fábricas consisten en introducir cambios que afectan al mismo tiempo a las formas y a las propiedades intrínsecas con el objetivo de obtener nuevos materiales que cuenten con nuevas propiedades que se adapten mejor a la producción de edificios.

Obtención de la forma con cambios en el material

Los procesos que buscan cambios tanto en la forma como en el material pasan por tres fases principales, con tres diferentes objetivos:

- primera, conseguir masas de material eminentemente plásticas, es decir, que puedan adoptar diferentes formas y que las mantengan durante el tiempo necesario.

- segunda, dar la forma definitiva a esta masa plástica y,

- tercera, mediante los cambios definitivos en la estructura fisicoquímica del material, conseguir que la forma obtenida en la segunda fase adquiera unas características ya invariables de rigidez y resistencia.

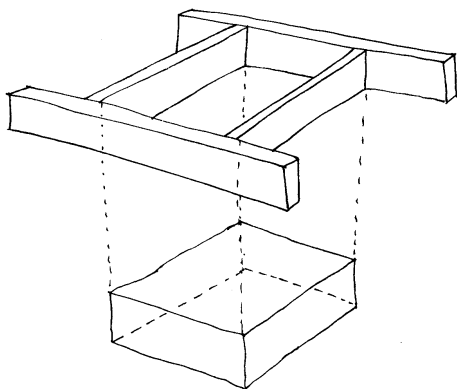
Si bien son tres fases que conceptualmente pueden ser diferentes, en muchos de los procesos están mezcladas entre sí produciéndose simultáneamente. Veámoslas con algo más de detalle.

Las masas plásticas se pueden conseguir mediante métodos tan simples como la mezcla con agua, tal como ocurre en el caso de la arcilla para hacer piezas cerámicas, o en las mezclas con conglomerantes, o algo más complicados como la fundición a altas temperaturas en el caso del vidrio y los metales.

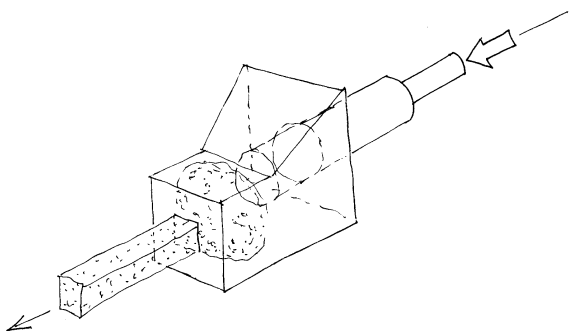
Determinados procesos como el laminado del acero utilizan maquinarias tan potentes que consiguen que materiales rígidos como el acero actúen como masas plásticas y deformables, como veremos líneas más adelante.

Los procesos más usuales para generar nuevas formas son los siguientes:

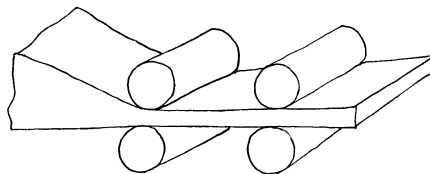
- el moldeo, en el que la forma deseada se obtiene mediante un molde o pieza con una cavidad en la que se introduce la masa plástica en forma de polvo, de pasta o líquida, con tal que, al pasar al estado sólido, adopte la forma inversa a la de la cavidad. Así se fabrican todos los elementos de hormigón, como bloques para la construcción de muros, paneles prefabricados para fachadas, etc.



- la extrusión, en la que la masa plástica pasa con una cierta presión por una o más hileras que le da la forma básica que se completa con el corte. Por extrusión se obtienen muchos materiales cerámicos, como los ladrillos huecos o calados.



- el laminado, que consiste en hacer pasar la masa plástica entre dos rodillos, cilíndricos o con cierto perfil, con lo que se consigue una lámina con el perfil deseado de mayor o menor grueso según cada caso y de longitud ilimitada que se corta cada cierto tramo.



De los diversos procesos de variación de las estructuras fisicoquímicas, los más corrientes son:

- la cocción, que consiste en someter el material a la acción de altas temperaturas debidas al fuego o a cualquier fuente de calor dentro de hornos, que consiguen introducir variaciones en la composición del material, como es el caso de la cerámica.

- el fraguado, o proceso mediante el cual un conglomerante (como el cemento), a causa de los cambios fisicoquímicos que tienen lugar al hidratarse sus constituyentes, se transforma de líquido o pastoso en sólido rígido y resistente. Es el caso todos los elementos realizados con morteros u hormigones de cemento portland, conformados con un molde, o el del cartón yeso conformado por laminación.

- el enfriamiento, al que han sido sometidos los materiales que han adquirido las cualidades plásticas como consecuencia de su elevada temperatura, como es la fundición del vidrio o la de los productos básicos del acero.

En bastantes casos los cambios en la forma y en el material son independientes y sucesivos. La cocción de los cerámicos es posterior a su extrusión, y el fraguado del hormigón posterior a su moldeo. Otros procesos introducen simultáneamente las variaciones como es el caso del laminado del acero.

Antes de entrar en el estudio algo más detallado de alguna de estas técnicas es conveniente hacer un primer análisis de los procesos de conformación de los materiales desde el punto de vista de la eficiencia productiva.

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS PROCESOS DE LA PRIMERA CONFORMACIÓN

Las técnicas utilizadas en las fábricas, en contraposición con las de producción in situ de los edificios, se caracterizan por tres aspectos clave:

- su capacidad de producir en serie,
- la posibilidad del control efectivo de calidad, y
- la posibilidad de reducir los costes sin mermar la calidad.

Los métodos de producción de los materiales de construcción en fábricas permanentes permiten la producción en grandes series, es decir, que durante un período largo de tiempo se produce la misma pieza en una enorme cantidad de unidades, sin introducir ninguna variación ni de forma ni de constitución material. Esto permite la utilización de todo tipo de máquinas y herramientas, y se puede llegar incluso a una total robotización de la producción, que ya no está influida por los errores en que pueden caer los operarios, sea por falta de habilidad o por cansancio, es decir, en función del factor humano. Pero además, estas enormes producciones en serie permiten establecer unos controles de calidad absolutamente precisos y reducir drásticamente los costes.

Como es imposible controlar la calidad de todas y cada una de las piezas producidas, se

hacen observaciones sólo de una parte muy reducida de la producción, que se llama muestra, determinada mediante procedimientos matemáticos: si las piezas de la muestra alcanzan el nivel de calidad deseado, se puede inferir que también lo hace el resto de la producción. Si la producción no es en serie, difícilmente podremos establecer este procedimiento.

La reducción de la mano de obra directa facilitada por las máquinas y las grandes series de producción tiene como consecuencia una reducción importantísima de los costes de producción, y como las condiciones dentro del taller son constantes y no sometidas a ningún factor aleatorio como la lluvia o el frío, se pueden hacer previsiones a largo plazo sobre los costes de producción y los beneficios.

Todas estas características son las propias de lo que se denomina la "producción industrial", que como se comprueba en el tema siguiente, son bastante difíciles de lograr en la producción de edificios in situ fuera de cualquier taller o factoría. En la producción in situ es difícil evitar la aleatoriedad del clima establecer controles de calidad efectivos y, por ello, los costes aumentan a causa de la incidencia de la mano de obra, hecho que también hace mucho más aleatorio, en función del factor humano, conseguir las calidades deseadas. Se ve en el próximo tema 14.

Pero antes, en los apartados siguientes se detallan algunos ejemplos que concretan las ideas generales expuestas hasta aquí y que son representativos de la multitud de operaciones que son necesarias para producir materiales de construcción. No se pretende, obviamente, dar una descripción completa, sino a través de algunos casos usuales, aclarar el sentido de las ideas generales.

ESTUDIO DE CASOS USUALES

Producción de amorfos

Tal como se ha indicado anteriormente, la producción de amorfos puede estar orientada hacia la obtención de los conglomerantes que

en forma de polvo podrán ir directamente a las obras o a otras factorías para hacer productos manufacturados de hormigón como bloques para paredes o grandes paneles.

En primer lugar veremos el método de obtención de los dos conglomerantes básicos, el yeso y el cemento portland, y a continuación, la producción del material de construcción más usado en la actualidad, que es el hormigón. En el apartado siguiente se detalla la producción de conformados de hormigón.

Conglomerantes. Yeso. Cemento portland

Se denominan conglomerantes a los materiales obtenidos por la cocción y pulverización de determinados tipos de rocas, que mezclados con agua producen una pasta moldeable que, debido a reacciones químicas irreversibles desencadenadas por el agua llegan finalmente a adquirir una consistencia pétrea y una buena adherencia con las superficies con que está en contacto.

En la actualidad existen tres tipos de conglomerantes, el yeso, la cal y el cemento. Aquí haremos referencia exclusivamente al yeso y al tipo de cemento más corrientemente utilizado, llamado cemento portland. La cal, único conglomerante para elementos estructurales hasta bien entrado el siglo xx, actualmente se utiliza sólo como complemento para la realización de determinados morteros de cemento.

Los materiales conglomerantes se presentan en el mercado en forma de polvo contenido en sacos. Mediante su mezcla con agua podemos obtener pastas, morteros y hormigones que pueden ser utilizados para realizar materiales de construcción como bloques, viguetas, etc., o utilizados in situ en la obra como elementos definitivos del edificio.

• El yeso

El yeso es el producto resultante de la transformación de una roca sedimentaria de estructura cristalina muy extendida en la naturaleza, denominada piedra de yeso o algez, constituida esencialmente por sulfato cálcico bihidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Si se somete a cocción a determinadas temperaturas, se produce una reacción mediante la cual se pierde una parte o toda el agua que contiene, y se transforma en hemihidrato o anhidrita. Una vez cocida se tritura y muele hasta convertirla en un polvo blanco al que se añade un retardador de fraguado y se comercializa envasado en sacos impermeables.



Factoría de producción de yeso.

Cuando se mezcla con agua, el polvo de yeso reabsorbe rápidamente el agua, y en menos de una hora ha readquirido el grado de hidratación inicial, es decir, el agua perdida durante la cocción, y vuelve a tener las propiedades naturales, en general mejoradas, tales como dureza, rigidez y resistencia, y un cierto aumento de volumen respecto a su masa inicial.

Los principales tipos de yeso empleados en la edificación son el yeso negro (en realidad es bastante blanco aunque con impurezas) con un 60 % de anhidrita, el blanco con un 80 % y la escayola con un 90 %.

En la actualidad, su uso se concreta en los revestimientos interiores de paramentos, placas y molduras que puede hacer el yesero con escayola en su taller y productos manufacturados para revestimientos de techo, etc. En nuestro país, desde hace relativamente pocos años, se utiliza para la fabricación de paneles denominados de cartón yeso, que, como semiproductos, sirven para realizar divisiones interiores y como sustituto de los revestimientos realizados in situ (II-7.1).

El uso del yeso ha de considerar dos precauciones fundamentales. El yeso no debe entrar en contacto con elementos o partes metálicas, ya que puede provocar agresiones

químicas especialmente dañinas. Y por otro lado, su higroscopicidad más o menos marcada aconseja no usarlo más que en ambientes secos y nunca al exterior, para evitar que una nueva absorción de agua después de fraguado provoque una pérdida de cohesión del material.

• *El cemento portland*

Es un conglomerante obtenido por cocción y molienda de piedras calcáreas con porcentajes de arcillas que superan el 27 %. La materia prima molidura, dosificada y homogeneizada se sitúa para su cocción en la extremidad superior de hornos rotatorios constituidos por un largo cilindro de eje ligeramente inclinado, y en el extremo inferior está situado el dispositivo de combustión. El material recorre todo el cilindro encontrando a lo largo de su recorrido una temperatura creciente. La calcinación completa se produce a temperaturas superiores a 1.000 °C. El producto de la cocción, el clínquer, enfriado con aire a la salida del horno, tiene el aspecto



Factoría de producción de cemento portland.

de granos de diversas dimensiones. Para convertirlo definitivamente en cemento, el clínquer se ha de machacar y pulverizar y aditarlo con otros productos, tales como el yeso y adiciones, con tal de obtener materiales con las características que se deseen.

Variando la mezcla, la temperatura de cocción y la finura de molido se obtienen diversos tipos de cementos. Cuanta mayor finura de molido, por ejemplo, mayor resistencia a compresión tendrán los elementos realizados con ese cemento, pero, por contra, se acentúa la capacidad para producir fisuras por retracción.

Es uno de los materiales de construcción de producción más extendida, sometido a los procesos de alta industrialización que en general garantizan con bastante precisión las características finales del producto.

Con el cemento se realizan morteros y hormigones mediante los cuales podemos realizar piezas manufacturadas en fábricas, como bloques para muros, vigas o grandes paneles, o bien utilizarlos directamente en las obras.

Hormigón

El hormigón es el resultado de la mezcla de un conglomerante, habitualmente cemento portland, con áridos inertes, habitualmente arena y grava, agua, y eventualmente adiciones y aditivos, todo ello en unas proporciones muy precisas.



Central de producción de hormigón.

Como consecuencia del proceso de fraguado originado por su contacto con el agua, el cemento adquiere una rigidez y una resistencia propias de la piedra y actúa uniendo fuertemente todos los granos de los áridos dando resistencia a todo el conjunto.

La propiedad intrínseca más importante es su resistencia a compresión. Si ha de proteger armaduras de acero, como ocurre con el hormigón armado, además interesa reducir al mínimo su porosidad (I-11).

La resistencia a compresión final del hormigón viene influida por tres grupos de factores:

- la adecuación y calidad de los componentes,
- el proceso de elaboración del hormigón fresco y,
- el proceso de puesta en obra (I-14), o de manufactura de piezas prefabricadas.

Los factores que interesa destacar ahora son los del segundo grupo y son los siguientes:

- dosificación, es decir, relación de volúmenes entre el cemento y los áridos y su granulometría,
- relación del agua cemento y,
- elaboración de la pasta.

La resistencia de la masa una vez fraguada depende directamente de la cantidad de cemento empleado. Su presencia en un metro cúbico de hormigón oscila, como mínimo, entre 150 kg, con lo que conseguiremos un hormigón poco resistente, hasta un máximo de 350 kg para obtener hormigones de altas resistencias.

Un hormigón para un elemento estructural de hormigón armado de solicitaciones normales, requiere una dosificación del tipo: arena $0,4 \text{ m}^3$, grava $0,8 \text{ m}^3$ y de cemento unos 300 kg por m^3 .

Sin embargo, es posible que en igualdad de dosificaciones se obtengan hormigones con características muy diversas, ya que la dosificación correcta es una condición necesaria, pero no suficiente para obtener un hormigón de características determinadas. Pueden producirse variaciones debido al contenido de humedad de los agregados o de la granulometría de los áridos.

El segundo factor en importancia es la relación agua-cemento ya que tiene una influencia

directa en dos variables básicas: la resistencia a compresión final y la trabajabilidad de la pasta.

La función esencial del agua unida al conglomerante es producir, a través de la hidratación, el fraguado. Para activar este fenómeno químico es suficiente una relación de 30 l de agua por 100 kg de cemento, pero en la práctica, una cantidad de agua tan pequeña determina una masa de hormigón muy seca y prácticamente imposible de trabajar en la obra. Es necesario recurrir a relaciones agua-cemento más altas, que pueden alcanzar unos valores entre 0,5 y 0,7 pero sin sobrepasar estos valores ya que puede ocurrir que se produzca un exceso de porosidad, un aumento del fenómeno de la retracción o falta de homogeneidad en la pasta final.

La variable que queda por comentar es la granulometría o relación entre los diferentes tamaños de los agregados. Valga decir que existen unas distribuciones de diferentes tamaños de los agregados que son óptimas y con las que se consigue un máximo de compacidad utilizando el mínimo de cemento, lo cual garantiza que con medios económicos conseguimos hormigones resistentes.

Si el hormigón va dirigido a una factoría de elementos prefabricados de mayor o menor tamaño, en la que mediante los procesos industriales podemos controlar todos los problemas que comentaremos más adelante de puesta en obra, la cantidad de agua puede ser



Fábrica de viguetas de hormigón.

pequeña y la consistencia seca, con lo cual se consigue reducir los costes y los posibles defectos debidos a un exceso de porosidad o retracción.

Por contra, si el hormigón va dirigido a una obra normal, las dosificaciones han de permitir hormigones mucho más trabajables y adaptables a los diferentes encofrados. Dependiendo de las dificultades, la consistencia será plástica o blanda, valores que se pueden determinar mediante el ensayo de cono de Abrams (véase I-14). Sin olvidar que a mayor plasticidad, mayor cantidad de agua hemos de añadir, manteniendo la relación agua-cemento en la cantidad óptima, lo cual encarece el producto.

Por último, se ha de mencionar que existen en el mercado una gran diversidad de productos químicos que pueden influir en algunas de las propiedades anteriores y, en consecuencia, en sus procesos de producción, tales como aceleradores de fraguado o plastificantes.

Producción de conformados sin cambios en el material

Pequeños elementos de piedra natural

Los materiales pétreos naturales han tenido una importancia decisiva en la historia de la arquitectura, tanto en la popular como en la monumental. La mayoría de los edificios anteriores al siglo xx tienen gran cantidad de elementos realizados en piedra natural, desde los pavimentos hasta los elementos estructurales portantes verticales como muros de sillería o mampostería.

Pero el siglo xx, y en parte también el anterior, ha supuesto un cambio radical en esta situación por la aparición de nuevos tipos de estructuras o por el desarrollo de las “piedras artificiales”, como el terrazo para pavimentos, más baratas que las naturales.

En la actualidad, las piedras naturales han desaparecido de las estructuras portantes, pero mantienen un papel importante en los revestimientos, que pueden ser de paramentos verticales o pavimentos, tanto exteriores como interiores, aunque más bien de carácter suntuoso ya que sus costes sólo se justifican en ese caso.



Cantero elaborando una pieza moldurada para la restauración de edificio histórico.

Estos elementos se obtienen a partir de las rocas naturales que son masas cristalinas o amorfas (en términos geológicos) generalmente compuestas de agregados de minerales diversos con una composición química bastante heterogénea.

La clasificación básica de las piedras es consecuencia de su “proceso de fabricación”, es decir, de su origen natural, que puede ser de tres tipos: ígneo, sedimentario o metamórfico.

Las rocas ígneas se han formado por enfriamiento y solidificación del magma proveniente de zonas más o menos profundas de la corteza terrestre.

Las rocas sedimentarias son consecuencia del depósito de los productos de la alteración mecánica o química de rocas preexistentes, causadas por agentes atmosféricos, los movimientos marinos e incluso los organismos vivos.

Las rocas metamórficas provienen de rocas ígneas o sedimentarias o también metamórficas preexistentes sometidas a unas condiciones de presión o temperatura muy intensas, que han producido unas transformaciones

radicales hasta llegar a una estructura que las hace difícilmente identificables con su roca de origen.

De las numerosísimas variedades que existen de cada una de ellas, sólo citaremos las más utilizadas. Del primer grupo, y destacada sobre el resto de variedades, se nos presenta el granito o el basalto. Del segundo, las piedras areniscas, los travertinos y la piedra calcárea. Del tercero, la cuarcita, la pizarra y los mármoles.

El proceso de transformación del material natural consta de las fases de extracción en las canteras, transporte a los centros de primera elaboración, primera fase de conversión en placas y, según sea la utilización final de la piedra, la obtención de la forma definitiva.



Corte con sierra de una placa en un taller de marmolistería.

Si consideramos elementos superficiales de revestimiento de fachadas o de pavimentos, esta transformación pasa por una primera fase



Pulido de una placa de mármol.

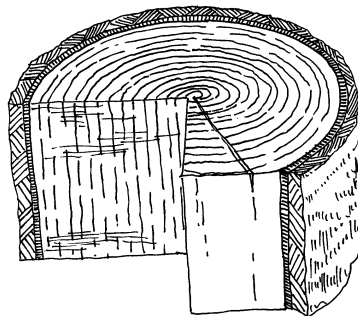
de conversión en placas de dos o tres centímetros, mediante sierras mecánicas, que finalmente se vuelven a cortar hasta conseguir el tamaño de placa requerido, a lo que sigue el acabado superficial.

El uso final de las piezas determinará qué propiedades intrínsecas y formales han de tener. El grado de posible deterioro de una piedra no es el mismo si está en el exterior o en el interior, o si está formando un pavimento o un aplacado de pared.

La piedra ha de tener las propiedades intrínsecas ya en su origen y poco se puede hacer sino escoger bien el producto de la cantera. Donde mayor influencia podemos tener es en la fijación de las dimensiones, especialmente el grosor, que determinan las prestaciones de comportamiento mecánico.

Productos de madera

La madera es una masa fibrosa compuesta de células sólidamente unidas entre sí, constituida por agua, celulosa, hemicelulosa, lignina, tanino, alcaloides y otros productos esenciales.



Si bien existen infinidad de especies arbóreas que pueden dar lugar a muchos tipos de maderas, en el ámbito por el que discurre este libro, se reducen a bien pocas. Destacan dos grandes grupos: las coníferas (pino y abeto) y las frondosas (roble, castaño, haya, etc.).

Como material de construcción está dotado de propiedades intrínsecas muy positivas vistas en los temas anteriores, tales como una buenísima relación entre resistencia mecánica y densidad, buena durabilidad y una adecuada resistencia al fuego, siempre que se respeten

determinadas condiciones, a lo que hay que añadir el ser representante dentro de los edificios de un trozo de la naturaleza, con un aspecto y un tacto que le confieren un carácter amable muy valorado.

Todos los inconvenientes ya vistos, la debilidad frente a determinados hongos e insectos, o la anisotropía y la sensibilidad a las condiciones higrométricas ambientales, con la consiguiente inestabilidad dimensional, se deben prevenir a través de los procesos de producción y posterior mantenimiento.

Según el tipo de elementos que se realicen, los trabajos realizados con madera en la edificación se denominan:

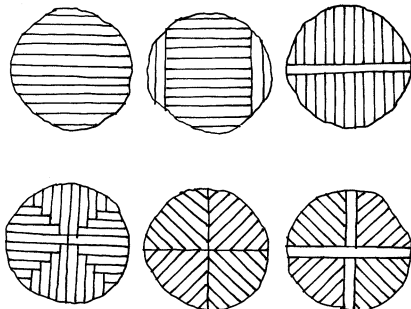
- carpintería de armar, cuando son elementos estructurales,
- carpintería de taller, cuando son ventanas, puertas, y pavimentos.

Las diferentes elaboraciones de la materia prima extraída de los bosques da lugar a tres grandes grupos de productos:

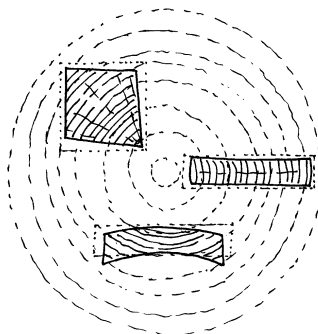
- madera aserrada, de sección transversal rectangular con la que se pueden utilizar tanto para carpintería de armar como de taller,
- tableros derivados de la madera, que pueden ser de varios tipos, utilizables también en los dos casos,
- madera laminada encolada, obtenida por la unión y encolado de lamas de madera macizas de reducido tamaño, utilizada exclusivamente como carpintería de armar.

Las piezas de **madera aserrada**, producidas en los aserraderos industriales, tienen una

dimensión mayor (largo) que las dos de la sección o escuadría (canto o espesor es la dimensión menor y ancho la otra). El corte de los troncos se realiza de manera que se obtienen estas piezas directamente, unas u otras según sea



las dimensiones del tronco original, buscando mediante la geometría del corte neutralizar al máximo los movimientos posteriores de las piezas aserradas.

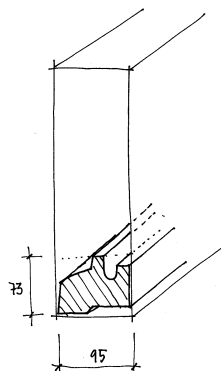


La elaboración, a partir de estas piezas, de elementos de armar o taller, requiere:

- una primera transformación de la sección adaptándola al perfil necesario, por ejemplo, un



Taller de carpintería con un acopio de madera aserrada.



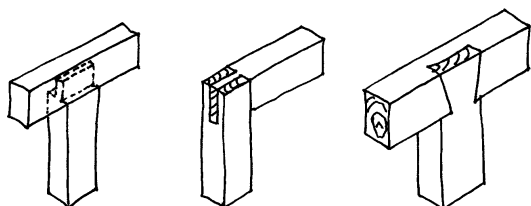
marco de ventana, que se realiza mediante herramientas mecánicas como la tupí u otras,

- la unión de las piezas,

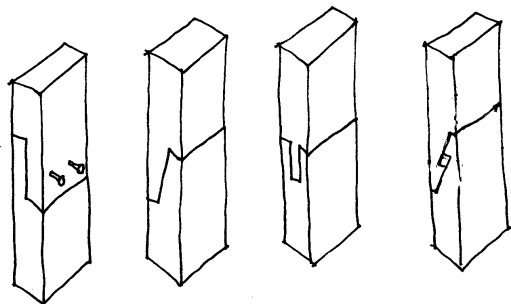


Proceso de elaboración de una puerta balconera.

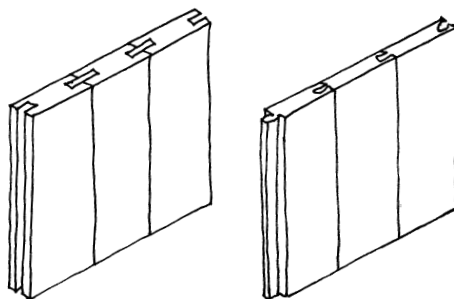
Estas uniones, que se complementan con un encolado, se pueden realizar mediante:



- ensambles, que pueden ser en caja y espiga, de horquilla, de cola de milano, etc.,



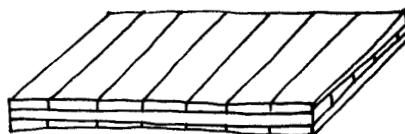
- empalmes, que pueden ser a media madera con clavijas, en pico de flauta, en horquilla, en rayo de júpiter, etc.,



- acoplamientos, que pueden ser de ranura y lengüeta, machihembrado, etc.,
- fijaciones metálicas.

Los **tableros de madera** son piezas con dos dimensiones mucho más grandes que su espesor que se obtienen por diferentes procedimientos que dan lugar a:

- tableros de madera maciza formados por tablas machihembradas,
- tableros aglomerados de partículas, resultado de la laminación de una pasta compuesta de virutas de madera y colas,
- tableros contrachapados, resultado de la superposición entrecruzada de varias chapas,



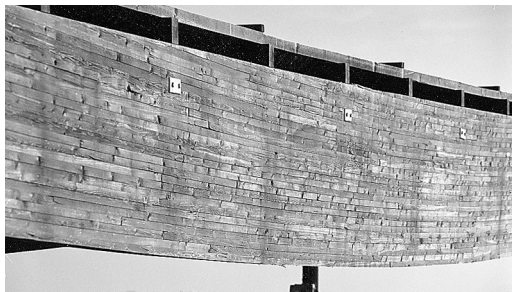
- tablero de fibras, que pueden ser de fibras duras o de densidad media,
- tableros de lana de madera.

En todos los casos, al no darse una dirección dominante en la situación de las fibras de la madera original, sus movimientos se contrarrestan unos con otros quedando el tablero en su conjunto dotado de una estabilidad dimensional mucho mayor.

Su utilización en las obras se corresponde con la de los semiproductos. Con tableros podemos hacer todo tipo de elementos, tabiques, soportes de pavimentos, de cubiertas, de revestimientos de fachada, etc.

La **madera laminada encolada** o simplemente laminada, es la que se obtiene mediante el encolado, con adhesivos de alta resistencia,

de tablas de madera, denominadas láminas, que según sean coníferas o frondosas deben tener unas determinadas escuadrias máximas y, en cualquier caso, espesores inferiores a 45 mm y secciones no superiores a 100 cm². El adhesivo ha de generar una unión mecánica entre las láminas igual a la natural entre las fibras de madera.



Tramo central de una viga de madera laminada de sección variable.

El proceso de fabricación ha de vigilar especialmente todo lo que influye en la eficacia del encolado, como que las superficies estén limpias, etc., y las formas que se les da a las juntas en los empalmes por testa de las láminas.

La ventaja principal es que se pueden conseguir elementos estructurales de dimensiones mucho mayores que los obtenidos por la madera aserrada que, además, pueden tener formas muy variadas (ver página 47).



Apoyo y extremo en voladizo de la viga anterior.

Otras ventajas se derivan de su mayor estabilidad dimensional y de que es posible realizar elementos de calidades totalmente homogéneas desechando las partes defectuosas de las maderas originales (II-5.3).

Como es fácil comprobar, la madera es un material con un gran pasado y con un gran futuro.

Producción de conformados con cambios en el material

Pequeños elementos de cerámica

Los productos cerámicos pueden tener aspectos y características diversos en base a la combinación de los siguientes factores:

- calidad de la arcilla,
- presencia de aditivos,
- temperatura y modalidad de cocción y,
- tratamientos superficiales.

La forma final depende del uso que vaya a tener dentro del edificio. Podemos distinguir como fundamentales:

- piezas para muros, desde ladrillos hasta bloques,
- piezas para cubiertas, como tejas,
- piezas para revestimientos como baldosas, azulejos y,
- bloques para el entrevigado entre forjados.

La arcilla es una roca sedimentaria de origen clástico de grano muy fino, formada por constituyentes mineralógicos de elevada heterogeneidad provenientes de la alteración de rocas ígneas. El componente fundamental es el caolín o silicato de aluminio hidratado. Cuando no tiene impurezas presenta un color blanco y da lugar a los productos de cerámica más finos, no utilizados apenas en la construcción, excepto en las piezas para sanitarios.

Las impurezas contenidas en la arcilla están formadas por los óxidos ferrosos que determinan el color rosado.

La primera operación del proceso es la selección y mezcla de la arcilla con agua para conseguir una masa plástica o pasta moldeable. Su calidad como material para ser transformado depende de su plasticidad y su composición granulométrica.

La primera es la aptitud de la pasta de arcilla de ser fácilmente deformable por acciones mecánicas, pero de manera que conserve permanentemente esa forma hasta el momento de

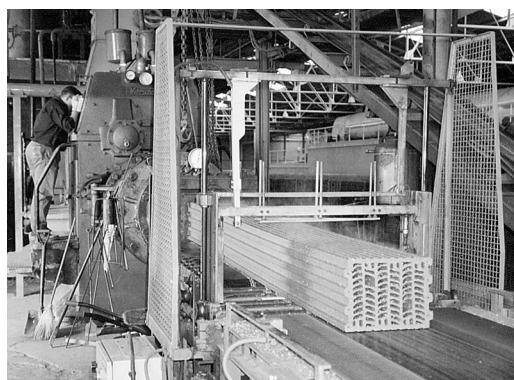
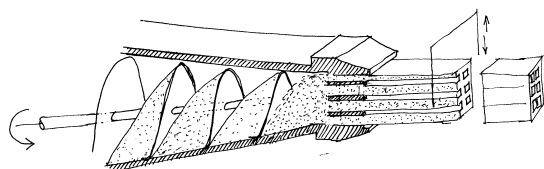
la cocción. La plasticidad es directamente proporcional a la cantidad de agua absorbida por la arcilla. La plasticidad favorece la trabajabilidad de la pasta, pero influye negativamente sobre la estabilidad dimensional una vez se seca dando lugar a la retracción. Para evitarla, se recurre al empleo de aditivos particulares como la arena, el silicio u otros productos.

La composición granulométrica depende de la variedad y de la distribución de las dimensiones de las pequeñas partículas constituyentes, que pueden ir desde 5 micras hasta 10 o algo más. La composición granulométrica es un factor muy importante ya que, como ocurre con el hormigón, las partículas más pequeñas favorecen una mejor cohesión de toda la pasta mientras que las más grandes limitan la retracción del material durante la cocción y constituyen su esqueleto portante.

Una vez conseguida la pasta más conveniente para el producto final, es necesario darle la forma que una vez realizada la cocción tendrá durante toda su existencia.

Existen los procedimientos siguientes:

- extrusión, en el que la máquina hace pasar a presión la pasta de arcilla, con un conte-



Proceso de conformación por extrusión de bloques de cerámica ligera, a falta del corte de la masa extruida que determinará la tercera dimensión del bloque. Su elaboración será completa cuando se haya producido la cocción en el horno.

nido de agua entre 15 y 20 %, a través de una abertura con un perfil preestablecido denominado hilera o galletera, obteniendo un chorro plástico que se va cortando mediante hilos de acero hasta darle la longitud precisa del producto. Es la manera habitual de producir ladrillos o bloques huecos, etc.

- moldeado por prensa, en el que el molde con la forma negativa de la pieza final, una vez se ha introducido la pasta, ejerce una presión con tal de obtener una buena compactación, la expulsión del aire de la masa, y la parcial deformación de los granos. Es el procedimiento para conseguir, por ejemplo, tejas de tipo alicantino, baldosas, azulejos, etc.

Una vez obtenida la forma y antes de pasar a su cocción es necesario proceder al secado en el que se produce una primera contracción o retracción por pérdida de agua.

La fase final es la cocción, de la que se pueden destacar las siguientes fases:

- hasta 200 °C pierde agua el pastado y todavía es reversible,
- de 200 a 650 °C pierde agua de constitución y ya no es reversible.
- de 650 a 950 °C se producen cambios químicos que dan lugar a nuevos compuestos a los que ya podemos llamar definitivamente cerámica.
- a partir de 1.750 °C aumenta la compacidad y puede llegar hasta la vitrificación, incluso la fusión.

En general se produce una segunda retracción por pérdida de agua.

El fabricante deberá tener controladas todas las fases en las que se producen cambios de forma y conseguir una regularidad de las piezas, con dimensiones lo más cercanas posible a sus valores nominales.

En cuanto a las propiedades intrínsecas, dos son las que definen claramente la calidad final: la porosidad y la resistencia a compresión. Ambas son consecuencia de la habilidad del fabricante a la hora de hacer la pasta inicial definiendo su plasticidad y su composición granulométrica, y el posterior control de la temperatura de cocción de todas las piezas. Además, en el caso en que el aspecto tiene importancia, como, por ejemplo, el ladrillo visto, se ha de añadir a estas propiedades intrínsecas el color y la textura.

Los defectos de las piezas pueden surgir en cualquier momento del proceso. Si la arcilla no se ha controlado correctamente pueden existir:

- sales solubles que dan lugar, una vez el ladrillo puesto en obra ha estado sometido a la acción del agua, de lluvia, a las eflorescencias ya citadas en el tema anterior,
- nódulos de cal (CaO), que también bajo el efecto del agua, que puede ser de lluvia o de la propia obra, se convierten en hidróxido de calcio, aumenta de volumen y puede fragmentar el ladrillo.

Si la pasta y el proceso no son correctos, pueden darse irregularidades en la forma que hagan difícil su puesta en obra.

En cada uno de los temas del segundo tomo aparecen las características intrínsecas que son necesarias en los diferentes casos según el uso que se hace de las piezas.

Elementos de mortero u hormigón

Mediante la utilización de morteros u hormigones y por el método de moldeado podemos llegar a obtener pequeños elementos o componentes de gran tamaño. Los procesos de producción pasan en primer lugar por la elaboración del hormigón o el mortero fresco, siguiendo las indicaciones citadas anteriormente, para luego verterlo en los moldes.



Bloques de hormigón recién moldeados para entrevigado de forjados. Su elaboración será completa cuando se haya producido el fraguado al cabo de unas horas.

En el tema siguiente se hace un análisis de las fases de la puesta en obra in situ destacan- do aquellos aspectos que más influyen en el resultado final. Aquí se hará referencia rápidamente a todos ellos destacando que precisamente el hecho de estar trabajando en una factoría nos permite controlarlos con muchísima mayor precisión. Por ejemplo, la altura del vertido del hormigón sobre el molde puede ser absolutamente mínima, el vibrado puede ser totalmente preciso en lo que respecta a amplitud y período, y el curado puede ser perfectamente controlado.

Mediante todos estos procesos, la industria ofrece infinidad de productos manufacturados de hormigón o mortero, entre los que podemos citar bloques para paredes, adoquines para pavimentos exteriores, baldosas de terrazo para pavimentos, bloques para entrevigados, placas y vigas armadas, semivigas de diferentes tipos, etc.

Productos de acero

Se definen como metálicos los materiales constituidos por metales y sus aleaciones, sometidos a una elaboración del mineral por medio de procesos metalúrgicos.

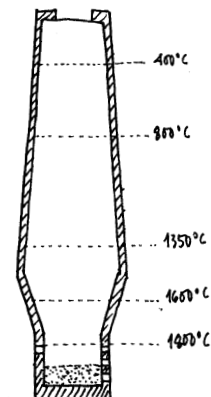
Los metales están caracterizados por una estructura química cristalina compacta y homogénea que los convierte en similares o casi iguales a un cuerpo isótropo, es decir, que posee las mismas características físicas en cualquier dirección. Con relación a los utilizados en la construcción hay que distinguir dos grandes grupos:

- los materiales ferrosos o siderúrgicos, basados en el mineral de hierro,
- los materiales no ferrosos, de otros metales y sus aleaciones, tales como el aluminio, el cobre y el cinc.

En este apartado sólo hablaremos de los primeros.

Los materiales ferrosos siempre son una aleación de hierro con carbono. Según sea la proporción de éste, se obtiene fundición con un contenido de carbono entre el 2 y el 4 %, y acero, con contenidos inferiores al 2 %. El acero se emplea en forma de perfiles laminados en

caliente, planchas, perfiles conformados en frío, tubos para conducciones, etc., o formando parte del hormigón armado en forma de redondos. Existen aleaciones especiales tales como las que permiten obtener aceros inoxidables.



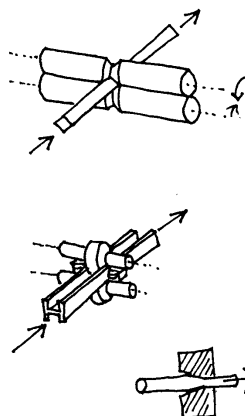
El ciclo de producción del acero tiene las siguientes fases básicas.

El mineral de hierro extraído de las minas, después de haber estado sometido a una serie de operaciones preliminares, se lleva a la fusión en el alto horno, que es un enorme contenedor vertical de acero revestido internamente de material refractario, dentro del cual la temperatura aumenta desde arriba hacia abajo hasta llegar a 1.900 °C. El alto horno trabaja ininterrumpidamente durante muchos años produciendo infinidad de toneladas de fundición.

El mineral de hierro y el carbón de coque se vierten por la parte superior, de forma que se van produciendo diversas operaciones de transformación en su recorrido desde arriba hasta abajo. Al llegar a la parte inferior se separa la fundición de la escoria.

La fase siguiente convierte la fundición en acero por reducción del contenido de carbono, lo cual se consigue mediante los denominados convertidores, siendo el de Thomas el más utilizado en la actualidad.

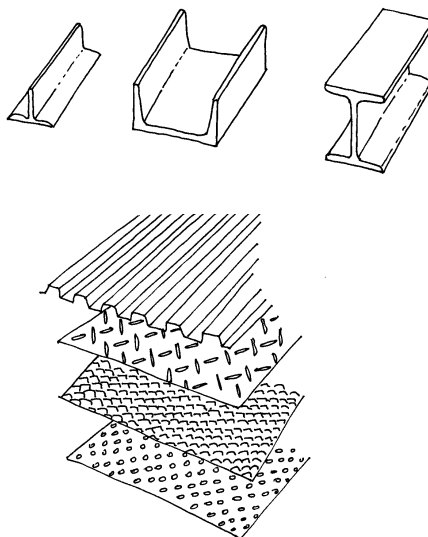
Por todos estos medios llegamos a los productos de acero, los cuales ya presentan sus propiedades intrínsecas, pero todavía carecen de la forma para poder ser utilizados en la construcción. La forma se consigue mediante los siguientes sistemas posibles: la laminación, el perfilado, la extrusión, el estampado y el plegado.



Existen tratamientos posteriores que mejoran todavía sus propiedades como el temple, el recocido, etc.

La laminación y el trefilado provocan una fuerte deformación de la estructura cristalina y formaciones de tensiones internas con efectos similares a las del templado.

Los productos finales utilizables en las obras son de muy diferentes tipos, perfiles, chapas plegadas, cables, etc.



Pasemos ya a ver las técnicas de puesta en obras de todos estos materiales de construcción.

TEMA 14. La conformación del edificio

CLASIFICACIÓN BÁSICA DE LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN IN SITU

Operaciones para la determinación previa de la forma

Procesos para la transformación del terreno

Procesos que elaboran materiales amorfos

Obtención de la forma

Cambios en los materiales

Procesos con materiales conformados

Con pequeños elementos

Con componentes

Con semiproductos

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN IN SITU

EL CONCEPTO DE INDUSTRIALIZACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN

ESTUDIO DE CASOS USUALES

Procesos de implantación geométrica

El replanteo del edificio

Procesos con materiales amorfos

La estructura de hormigón armado

Procesos con materiales conformados

El muro de ladrillo

Como ya se ha indicado anteriormente, este tema contiene una primera parte en la que se exponen los tipos y las características básicas de las técnicas de puesta en obra y una segunda en la que se repasan con algo más de detalle las técnicas más usuales. El objetivo es exponer las claves que permiten entender, en sus aspectos esenciales, la mayoría de las técnicas sin necesidad de verlas absolutamente todas, lo cual requeriría una gran extensión.

CLASIFICACIÓN BÁSICA DE LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN IN SITU

Los procesos de producción in situ son diferentes de los procesos realizados en las fábricas, aunque existen algunas coincidencias. Entre los métodos para dar forma se repite el moldeado, cuyos moldes cambian su denomina-

ción por encofrados, y entre los métodos de variar la estructura fisicoquímica se repite el fraguado, en el caso del hormigón o el yeso, y el enfriamiento, en el caso de los productos bituminosos para pavimentos exteriores.

Pero si hay alguna coincidencia, las diferencias son muchas más.

Una, que todo proceso realizado in situ requiere una determinación geométrica previa de la forma del elemento que se va a construir, lo cual no es necesario en la producción industrial ya que la forma viene determinada automáticamente por el mismo proceso.

Otra, que los procesos in situ se encuentran con un nuevo material de construcción de un tamaño considerable al que es preciso darle una nueva forma: el terreno. De hecho, es el único material con el que se cuenta para empezar una obra y que no es necesario comprar a un fabricante de materiales.

Una vez dada la forma conveniente a nuestro terreno, podemos ya empezar a producir nuestro edificio mediante técnicas que se aplicarán sobre materiales de construcción amorfos o conformados. Todas ellas tienen un objetivo común, dar la forma, y una preocupación clara en dos sentidos que habitualmente no preocupan en la producción en fábrica, dotar al nuevo elemento de:

- la continuidad mecánica para poder transmitir todas las cargas,
- la continuidad física para conseguir la estanquidad que facilite el ambiente adecuado en los espacios que hemos conseguido gracias a la correcta transmisión de las cargas,
- la prevención en su origen de posibles causas de degradación futura y,
- si es el caso, las propiedades que influyen en la conveniencia estética.

El conjunto de las acciones técnicas desarrolladas en las obras requiere una serie de precauciones y procedimientos que habitualmente quedan englobados bajo el concepto de organización de obra. Su objetivo es asegurar la via-



El camión hormigonera ha podido acceder a verter el hormigón en las zapatas. Los vertidos posteriores se realizarán con una grúa.

bilidad interna que permita el transporte de los materiales tanto en horizontal como en vertical y la realización de andamios necesarios para

ejecutar los elementos en altura, todo ello siempre bajo las estrictas normas de seguridad e higiene en el trabajo. Sobre estas cuestiones no se insistirá dado que su complejidad queda fuera del alcance del texto.

Veamos ahora las técnicas generales más importantes.

Operaciones para la determinación previa de la forma

Todos los procesos in situ requieren una operación previa que habitualmente se denomina replanteo; tiene como objetivo determinar, mediante señales, líneas, niveles, plomadas, etc., la forma que ha de tener, en general el edificio y, en particular, todos sus elementos constituyentes. Operaciones de replanteo se repiten muchas veces a lo largo del proceso de puesta en obra antes de la realización de cualquier elemento. Por ejemplo, cuando tenemos construido un forjado es necesario replantear sobre él los pilares de la estructura del piso siguiente o la pared de ladrillo que cerrará la fachada. Para realizarlos, son imprescindibles unos buenos conocimientos de geometría.

La primera operación de este tipo es la que fija la forma que debe adoptar el terreno en el exterior del edificio y la de los elementos del edificio que entran en contacto con el terreno, como los muros de sótano o plantas bajas, las instalaciones de saneamiento, las acometidas de otras instalaciones y, lógicamente, la cimentación.

Es muy importante la correcta ejecución de todos los replanteos ya que, como se ha insistido, la forma es una de las características básicas para conseguir la prestación deseada. Y, especialmente, la de aquellos que relacionan elementos que han de transmitir alguna carga, como pilares, paredes o cimientos. Líneas más adelante se detallan algunas de ellas.

Procesos para la transformación del terreno

Habitualmente, las acciones técnicas sobre el terreno se limitan a cambiar su forma en dos zonas: en la parte ocupada por el edificio para

permitir la ocupación de la parte enterrada y el tipo de cimentación que requiera su estructura y, en la parte exterior del edificio, para dar forma definitiva a los espacios exteriores.

En todos los casos se utilizan las técnicas de excavación, que pueden ser de zanjas y pozos para la cimentación, o las excavaciones



A la excavación general, cuya profundidad se advierte por el corte del terreno de la parte superior de la fotografía, le ha seguido la excavación de las zapatas de cimentación.

y rellenos en los terrenos exteriores. Ahora bien, existen algunos casos en los que mediante la introducción de nuevos materiales podemos mejorar algunas de las características del terreno, tales como resistencia a compresión o capacidad para facilitar la escorrentía mediante drenajes del agua (ver II-2.1 y II-1.1).

En todos los casos nos encontramos con un material natural con un proceso de formación geológica con una larga historia, del que es preciso conocer, con mayor o menor profundidad según los casos, su estructura fisicoquímica, para determinar las características intrínsecas que influyen en su comportamiento como elemento que recibe las cargas del terreno. Todo ello se consigue mediante el denominado estudio geotécnico, que habitualmente realizan geólogos u otros especialistas en geotecnia, que nos permite averiguar no sólo esas características, sino la estratigrafía o constitución subterránea imposible de advertir del exterior del terreno (II-3.1).

Finalizada la preparación del terreno podemos pasar a dar forma a los nuevos elementos constructivos mediante las siguientes técnicas.

Procesos que elaboran materiales amorfos

Obtención de la forma

Los materiales amorfos no tienen forma y el objetivo fundamental de su técnica de puesta en obra es dársela. Para hacerlo se pueden seguir los métodos ya vistos en el tema anterior, el moldeado, u otros que se basan en extender la pasta o el mortero sobre un paramento, el tendido.

El moldeado consiste en verter la pasta amorfa, casi siempre hormigón, en los moldes, que en la obra se denominan encofrados, que darán la forma definitiva a los muros de contención, los pilares, las jácenas y los forjados. Un caso particular es el visto en la imagen anterior de hormigonado de las zapatas cuyos moldes son precisamente las tierras que las delimitan.

Las formas posibles con el moldeado son ilimitadas y sólo dependen de las dificultades de la realización del molde. Si disponen de armadura de acero en el interior, al conseguir resistencias a tracción, el repertorio de formas se amplía todavía más. Las superficies de esas formas quedan determinadas, además de por la propia composición del material, por la textura, las dimensiones, las juntas y los dispositivos de fijación del material con el que se ha hecho el molde. De todo esto se habla en la segunda parte del tema. Si el elemento no se recubre después con ninguna otra capa y el hormigón queda visto, las texturas y dibujos tienen gran importancia en su valoración estética, tal como se comenta en I-15.

El tendido consiste en extender la pasta o mortero mediante una cierta presión encima de la pared que se ha de revestir, que actúa como molde superficial. Si el material es mortero de cemento, es preciso disponer una serie de juntas de retracción (de las que hemos hablado en I-11) que, dividiendo la superficie en zonas relativamente pequeñas, concentran y evitan la dispersión aleatoria de las fisuras de retracción. Si la superficie es grande, por ejemplo, una fachada, es conveniente además disponer de líneas que dividan y separen las zonas que se pueden realizar en una jornada. El dibujo de estas líneas puede tener importancia en la valoración estética del tendido acabado. Si el material es pasta de yeso, no se producen



Momento en el que el yesero extiende la pasta de yeso sobre la pared.

retracciones y normalmente no exige ningún tipo de línea sobre él.

La forma del tendido casi siempre coincide con la de la superficie sobre la que se extiende.

Cambios en los materiales

En los dos casos anteriores, los cambios que se producen en los materiales no pueden ser otros que los derivados del fraguado, ya visto en I-13, en el que los materiales conglomerantes se transforman hasta alcanzar una solidez y una resistencia que no tenían. El proceso requiere una serie de acciones por parte de los operarios con tal de obtener la compacidad, la resistencia y la textura requeridas, con lo cual las propiedades intrínsecas del material son consecuencia de las habilidades y cuidados de los operarios, lo que añade más incertidumbre al proceso, ya que si bien la forma es fácil de controlar, no lo son estas otras propiedades.

Procesos con materiales conformados

Los métodos de unión entre sí o sobre un soporte previo se pueden reducir a tres, la adición, la fijación y la soldadura.

La adición consiste en generar la forma del elemento mediante la agregación de piezas o pequeños elementos, ladrillos o bloques de hormigón en paredes, baldosas en revestimientos, que se unen entre sí mediante un mortero o un adhesivo, que adquiere sus propiedades resistentes y de adherencia después del proceso de fraguado o secado.

En la fijación se utilizan uniones puntuales resueltas con clavos o tornillos que se fijan sobre un soporte o uniendo las piezas entre sí. También pueden situarse aquí las uniones entre elementos de madera citados en el tema anterior.



Unión de un panel prefabricado al forjado por medio de angulares de acero con dos fijaciones cada uno.

La soldadura se aplica únicamente para la unión de elementos estructurales de acero. Habitualmente son piezas a medio camino entre los pequeños elementos y las componentes. Si ya vienen con su forma definitiva, la unión entre ellas se hace con tornillos.



Soldadura realizada in situ entre dos perfiles IPN de acero.

Con pequeños elementos

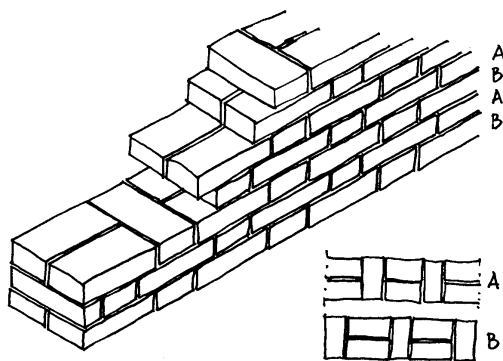
La unión entre sí de pequeños elementos con mortero, que podemos denominar adición, ha sido y es todavía en parte el procedimiento más utilizado para generar elementos constructivos. Es la técnica habitual con la que se realizan todas las obras de albañilería. Sólo se produce un cambio de material en el mortero que, si bien en volumen es pequeño, no lo es en trascendencia.

El mortero actúa como un material amorfo al que se ha de dar forma y controlar su proceso de fraguado, ya que de él dependen propiedades que influyen en su triple papel:

- como transmisor de las cargas que puedan solicitar al elemento, de manera parecida a como lo hace el ladrillo,
- como adhesivo de las piezas de ladrillo para dar cierta resistencia a tracción o cohesión al conjunto,
- como material para colmatar todo el conjunto de manera que sea una masa continua.

Todo ello es más fácil de conseguir si se disponen las piezas entre sí de manera laberíntica formando lo que se denomina el aparejo. En la figura aparece uno muy usual. Las claves de un buen aparejo son:

- evitar las juntas verticales continuas de mortero,
- conseguir el máximo solape entre piezas superpuestas.



Las formas posibles de las fábricas de ladrillo son muchas, aunque no tan ilimitadas como las del molde. La más común es el muro o pared, que puede ser de planta recta o de cualquier curvatura, que deberá resolver su es-

tabilidad confiando sólo en su resistencia a compresión. Otras formas, que como ya vimos en I-2 sólo trabajan a compresión, como los pilares, las bóvedas o arcos, también se realizan con esta técnica.



Puesta en obra de la primera hilada de la primera hoja de una bóveda a la catalana. A pesar de que la foto es actual, se ha de decir que es una técnica casi olvidada.

Si la fábrica de ladrillo se arma con redondos de acero en las juntas o transversalmente a ellas, el repertorio formal se amplía notablemente, aunque es un procedimiento poco utilizado en la actualidad.

Las superficies visibles de la fábrica quedan determinadas por las texturas y colores de los materiales y por el dibujo que forma el aparejo, tal como se desarrolla en I-15.

Con componentes

Los componentes llegan con su forma y características del material definitivas, y su puesta en obra se reduce a su fijación sobre los elementos que le sirven de soporte y el sellado de sus juntas.



Panel de hormigón de fibra de vidrio rigidizado con una estructura de perfiles en espera de ser colocado. La cara que quedará visible es la oculta en la fotografía.

Las formas posibles son tan variadas como las que pueden producir los procesos industriales vistos en I-13, tales como el moldeo de hormigón y otros muchos no reseñados, con lo que el repertorio de formas es casi ilimitado. El casi es debido a que los componentes han de ser transportados desde la fábrica hasta la obra e izados hasta su posición, lo cual comporta dos límites claros, el peso, la dimensión o ambos a la vez. Podemos imaginar el componente que queramos siempre que se pueda transportar y colocar.

Con semiproductos

Los semiproductos permiten ligeros cambios en su forma en la obra, como el corte de las piezas, finalizados los cuales se fijan con clavos,



Tabique realizado con paneles de cartón yeso.

tornillos u otros procedimientos y se sellan las juntas entre piezas para conseguir la continuidad del elemento. De hecho las formas posibles son muy variadas ya que existen diferentes tipos de semiproductos, pero en realidad se limitan a formas simples como la de los tabiques ligeros, las láminas impermeables, etc.

Los únicos cambios en los materiales in situ, al igual que en los componentes, sólo afectan a las juntas.

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN IN SITU

Además de las ya reseñadas en la introducción a este tema, podemos destacar nuevas diferencias con las técnicas aplicables en factorías fijas con relación a las variables de orden más bien económico consideradas en el apartado equivalente a éste en el tema anterior, el factor humano, la producción en serie, el control de calidad y los costes.

Se entiende por factor humano la repercusión que tiene en la obtención de un producto los posibles errores debidos a la manera "imperfecta" de actuar por parte de los operarios. Es imperfecta cuando se compara con la de una máquina que no está influida por el cansancio, las variaciones emocionales, etc. Nos guste o no, el factor humano encarece la producción y hace más aleatoria la calidad final.

Para detallar más esta cuestión es conveniente descomponer todas las acciones técnicas realizadas por un operario en operaciones elementales. Líneas más abajo, en los estudios de casos, se muestran ejemplos en los que se puede advertir que estas operaciones pueden dividirse en cinco tipos:

- las que determinan la forma previamente, como el replanteo,
- las que consiguen la forma, por ejemplo, en el hormigón, la realización del encofrado,
- las que afectan a las características del material, como la dosificación o el vibrado del hormigón,
- las que consiguen ambas cosas a la vez, como la operación de extender el yeso en una pared mediante la llana, o la de colocar un ladrillo en un muro sobre el mortero,
- las auxiliares.

Cuanto más cosas haya que hacer a la vez en una operación elemental, más difícil será, especialmente si una de ellas afecta al material. Lógicamente, las del cuarto tipo, presentes en las técnicas más tradicionales, son las más difíciles tanto de realizar como de controlar, y requieren mayor experiencia y habilidad; son las que están más influidas por el factor humano.

Si queremos reducir la aleatoriedad del factor humano, la solución es escoger técnicas que descompongan el conjunto de acciones en operaciones con un solo objetivo simultáneo. Por ejemplo, en el hormigón, la forma es independiente del material.

Pero, obviamente, por mucho que avancemos en ese sentido, la incidencia del factor humano en las técnicas in situ es mucho más elevada que en las industriales, en las que las propiedades finales de los materiales sólo dependen de la "habilidad" y "frieza emocional" de las máquinas.

La producción en serie es casi imposible en la fase de conformación final del edificio, ya que, en general, no hay dos edificios iguales. Y, aunque sea así, la producción de cada una de las partes se ha de producir según una secuencia en que, para volver a repetir el mismo elemento, se ha de pasar antes por otros; es decir, para volver a hacer un tramo de pared que se repita muchas veces, se ha de construir antes la estructura, haber colocado los marcos de las ventanas, etc., de manera que, si bien hay muchas partes que se repiten, no se pueden producir en serie.

Esto comporta una serie de dificultades como la imposibilidad de robotizar esta producción, que prácticamente siempre queda en manos de los operarios, sean albañiles, yeseros, colocadores u otros oficios de la construcción, como ha venido ocurriendo desde siempre.

Lógicamente, las consecuencias son muy importantes. El factor humano está presente de una manera muy notable; las equivocaciones, los errores, la influencia de los días de la semana en la producción final siempre es bastante notable, a la vez que imposibilita enormemente el control de producción y hace difícil la reducción de costes.

Las dificultades del control sobre la construcción in situ son bastante notables. Si se tuviera que garantizar totalmente una calidad final, se tendría que hacer un control de todo el edificio, ya que no es tan válida la representatividad de las muestras como ocurre en la producción en serie.

A pesar de todo, es imprescindible establecer un mínimo control de calidad, que se realizará en dos fases: el control de la recepción de los materiales que llegan a la obra con tal de comprobar que cumplen los requisitos establecidos, y el control de la producción sobre los elementos realizados in situ. La primera sólo ha de comprobar si se han realizado correctamente los controles de producción en la fábrica o en el taller. La segunda es la realmente dificultosa, ya que se ha de controlar el trabajo realizado en el edificio.

Lo más fácil de controlar en una obra son las características de forma, dimensiones, posición, etc., y lo más difícil, las características intrínsecas. Pero depende también del tipo de técnica empleada. No es lo mismo controlar un hormigón in situ en el que las características del material se han conseguido en buena proporción en la obra, que el montaje de un componente que sólo requiere su fijación y sellado.

Sin duda, en este caso el control de calidad es más cercano al de la fábrica.

Dejando de lado los costes financieros, el coste de materializar un edificio se concreta en tres partidas importantes: la compra de los materiales, el coste de la mano de obra y la amortización de las inversiones en maquinaria como las grúas, etc. Si bien la producción en fábricas permite reducir al mínimo el coste de la mano de obra, en la producción in situ es imposible, y es más, se puede considerar que su peso en el coste final está alrededor del 50 %.

Un dato clarificador sobre la influencia de la industrialización en la reducción de costes es que los de producción de los materiales de construcción, han disminuido desde principios del siglo xx a una octava parte aproximadamente, en cambio los de las obras sólo a la mitad.

EL CONCEPTO DE INDUSTRIALIZACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN

El camino para superar, aunque sea en parte, todas estas dificultades, es la industrialización de la construcción, es decir, desarrollar maneras de construir los edificios que intenten reducir al mínimo las diferencias entre la producción in situ y la producción en el taller.

Un camino ya suficientemente ensayado en la construcción de viviendas y que no ha dado los resultados esperados es el de la prefabricación de edificios mediante grandes paneles de hormigón. Casi todas las operaciones de conformación y transformación de los materiales se hacen en taller y en la obra sólo se realiza el montaje de los grandes paneles. Es un procedimiento que permite la producción en serie con todas sus ventajas, pero que requiere encargos con un número tan elevado de metros cuadrados de construcción para que realmente sea rentable, que lleva a una arquitectura poco satisfactoria por repetitiva.

Hay otros procedimientos que no buscan la producción en serie, sino que intentan reducir al mínimo las dificultades de la puesta en obra simplificando las operaciones, descomponiendo la obtención de la forma de la del material, incrementando la utilización de herramientas y procedimientos mecánicos, es decir, intentando que se mecanice la producción in situ más que trasladar la producción al taller, reduciendo además la necesidad de habilidad de los operarios en la consecución de la calidad de los materiales.

Un ejemplo es la técnica del hormigón armado, más sencilla que la del ladrillo para hacer estructuras, tal como se comenta más adelante.

Otro ejemplo más reciente es el de los paneles de cartón yeso que sustituyen con operaciones sencillas la complejidad de la realización de un tabique de ladrillo en panderete y su posterior enlucido de yeso.

En general, los denominados semiproductos, como el cartón yeso, son los materiales de construcción que permiten la industrialización sin caer en la rigidez de los grandes prefabricados. Pero no se pueden realizar todos los elementos de un edificio con semiproductos. En la actualidad siguen siendo válidos y utilizados en nuestro país todos los procedimientos, inclui-

dos los más tradicionales, como la obra de fábrica de ladrillos, los acabados del yesero, etc. El camino que se seguirá en los próximos años no es fácil prever. En cualquier caso, la industrialización de la construcción es un camino todavía a medio recorrer.

ESTUDIO DE CASOS USUALES

En los apartados siguientes se detallan algunos ejemplos que concretan las ideas generales expuestas hasta aquí y que son representativos de la multitud de operaciones que son necesarias para materializar el edificio. No se pretende, obviamente, dar una descripción completa de las técnicas, sino aclarar el sentido de las ideas generales a través de algunos casos usuales.

Empezaremos por el replanteo del edificio, que puede tomarse como representativa de todas las operaciones similares que es preciso realizar a lo largo de todas las fases de puesta en obra.

Seguirá el detalle de los dos procesos más habituales en todas las obras, la realización de un elemento de hormigón armado, concretamente un pilar, y la de un elemento de albañilería muy frecuente, una pared de ladrillo visto.

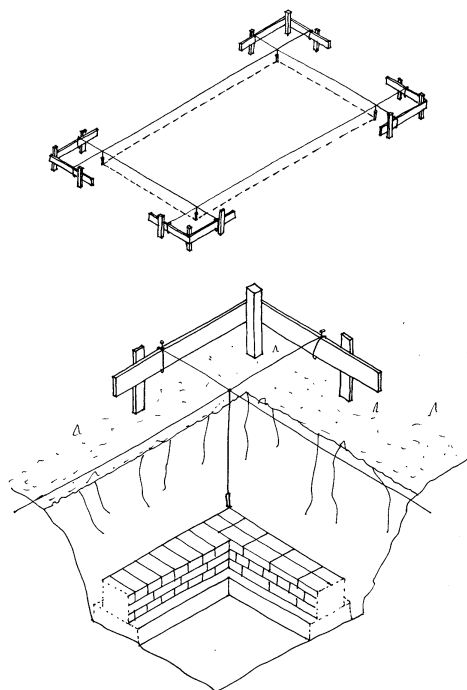
Procesos de implantación geométrica

El replanteo del edificio

El conjunto de operaciones del replanteo del edificio permiten situar sobre el terreno la posición exacta de las partes en las que el futuro edificio entra en contacto con el terreno.

Se desarrolla según las siguientes fases:

- delimitación de los límites de la propiedad sobre la cual construiremos,
- definición de posibles alineaciones de viales que todavía no estén trazados,
- replanteo propiamente dicho del perímetro del futuro edificio respetando las distancias establecidas a los confines de la propiedad,
- definición de la cota de nivel de referencia, por ejemplo, la cota de la planta baja del terreno, respecto a una referencia fija que resulte inamovible.



Las dos primeras sólo se efectuarán si la obra se encuentra en una urbanización algo precaria. Si el terreno es urbano, pocas veces son necesarias.

El replanteo se puede fijar mediante la hinca en el terreno de piquetas de madera o de hierro dispuestas sobre los vértices de la planta del edificio. Pero, dado que durante el transcurso de las operaciones de excavación de los sótanos o cimentación, con toda seguridad serán removidos de su situación, se colocan dos caballetes de madera denominados camillas, unidos rígidamente al suelo un metro o más hacia afuera del perímetro, que permiten tender un cordel situado sobre los piquetes metálicos. De este modo, la posición del vértice de la planta del edificio se puede fijar siempre con una plomada durante el curso de las excavaciones sucesivas.

Fijado el perímetro del edificio, es preciso pasar al replanteo de las excavaciones para realizar los cimientos.

Si son zanjas, es preciso marcar sobre el terreno ya desbrozado y explanado las dos líneas que las delimitan para guiar al operario encargado de la excavación. Para ello proce-

deremos igual que antes, fijando las camillas en el terreno no afectado, o aprovechando las ya puestas, sobre las que fijaremos cordeles con los que, por medio de la plomada, podremos determinar la situación de los bordes de las zanjas en el terreno, hecho lo cual se retirarán los cordeles para realizar la excavación. No se han de desmontar las camillas ya que también las utilizaremos para el replanteo de la base del muro o pared que irá sobre el cimien-to o para controlar la correcta factura final de éste.

Con procedimientos similares se marcarán todas las bases de los elementos a realizar, zapatas, pilares, vigas, casetones, etc. Todas estas operaciones pueden llevarse a cabo mediante instrumentos sencillos como las camillas, los cordeles, la plomada o los niveles de tubo flexible, o con instrumentos de precisión como taquímetros, teodolitos o niveles. La complejidad de la obra y la solvencia del constructor será el factor que decidirá su uso.

Procesos con materiales amorfos

La estructura de hormigón armado

De todas las operaciones necesarias para realizar una estructura de hormigón armado se ha escogido aquí la de un pilar que se dispone encima de la superficie de un forjado existente, ya que es bien representativa de todas ellas.

La primera operación es marcar, sobre la superficie del forjado anterior, la situación de las caras que van a definir el pilar, para lo cual será necesario realizar operaciones métricas similares a las ya citadas anteriormente.

Dentro de este perímetro deberán quedar incluidas en su situación correcta las armaduras provenientes del pilar situado en la planta inferior, denominadas de espera, que son las que van a dar continuidad a los dos pilares.

El paso que sigue es el montaje de las armaduras del nuevo pilar montadas con anterioridad en la misma obra por un especialista denominado ferrallista, teniendo especial cuidado en mantener su verticalidad y su situación en relación a la superficie del futuro encofrado, que determinará el espesor de recubrimiento y su protección contra la oxidación.



Armadura del pilar, apuntalada de manera algo precaria y solapada con la que sobresale de una zapata de cimentación, denominada armadura de espera.



Encofrado metálico usual.

A continuación se monta el encofrado. Habitualmente, los encofrados de pilares se realizan mediante placas metálicas modulares con bordes encajables que facilitan la operación, adaptándose a las medidas más usuales de los pilares.

En el caso de que no sea así, es posible realizar un encofrado mediante tablas de madera o de otros materiales, tal como se describen en II-4.2.



Encofrado de madera.

Todas estas operaciones buscan dar la forma adecuada al pilar, fijada por su papel de transmisor de cargas, lo que exige una gran precisión en la situación y verticalidad de su eje y en las dimensiones de su sección.

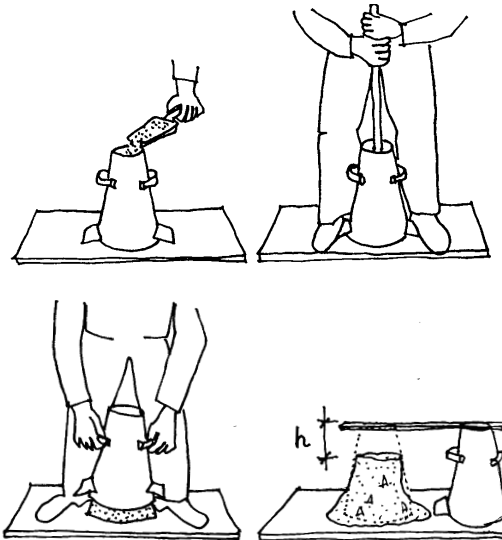
En todos los casos, el encofrado ha de ser indeformable, estanco y con sus superficies interiores tratadas con desencofrantes.

Si no es rígido, bajo el peso o empuje producido por el hormigón fresco, perderá su forma. Si no es estanco, se producirán pérdidas de la fase líquida del hormigón, normalmente

agua con cemento sin áridos que se denomina lechada. Si no se ha tratado con desencofrantes, la operación final de desmontaje se verá muy dificultada. Si es de madera, el mejor desencofrante es una cierta humedad.

Todas las operaciones anteriores se han regido siempre por cuestiones métricas, ya que buscan definir formas. Fijadas éstas, las fases siguientes sólo buscan que el material hormigón alcance las propiedades intrínsecas deseadas.

La primera operación es comprobar que el hormigón suministrado por la central hormigonera tiene la calidad solicitada. La plasticidad, consecuencia de la relación agua-cemento, se mide con el denominado cono de Abrams, y su correcta dosificación para alcanzar la resistencia especificada, mediante probetas que, una vez fraguadas se romperán en una prensa, la primera al cabo de una semana y el resto al cabo de cuatro.



También es aconsejable guardar alguna durante un cierto tiempo como posible testigo en caso de conflicto.

Hechas estas operaciones previas sólo en algunas de las amasadas del hormigón tomadas como muestras representativas, se puede proceder ya a su transporte en cubilote y su vertido en los encofrados, con las cautelas necesarias para evitar fallos en la obtención efectiva de la resistencia homogénea de todo el material vertido.



Conjunto de probetas, de 30 cm de largo y 15 cm de diámetro, de hormigón fresco recién vertido en los moldes cilíndricos.



Paso del hormigón de la hormigonera al cubilote.

Si vertemos el hormigón desde una altura mayor de 3 metros, con toda probabilidad se producirá una segregación de finos, es decir, la pasta de cemento se desplazará a la parte superior, y los áridos a la parte inferior, con lo que la parte superior del pilar tendrá una resistencia mucho mayor a la prevista, pero una muy inferior en su base. Como la capacidad portante va a depender de la parte más débil, el pilar no podrá soportar lo requerido.

La manera de evitarlo es reducir la altura de vertido y verter el hormigón en sucesivas ton-



Vertido desde el cubilote sobre un pilar adosado a uno ya desencofrado entre los que existe una junta de dilatación, ya que corresponden a dos partes del edificio separadas por dicha junta. Adviértase que también el pilar del primer plano está también desencofrado y con sus armaduras de espera sobresaliendo.

gadas, del orden de 80 cm cada una de ellas, intercalando entre cada una de las tongadas las operaciones de compactación por vibrado.

La resistencia final depende también de la compacidad del material, resultado del encaje mutuo de los diferentes granos de los áridos según sus tamaños. La manera de obtenerla en la obra es mediante el vibrador de aguja. Pero un exceso de vibrado puede llevar a una segregación de áridos y lechada que impedirá que, en ciertas zonas, se alcance la resistencia y la compacidad requeridas.



Para que se pueda advertir con mayor claridad la operación del vibrado, la imagen la recoge efectuada sobre un forjado. Sobre un pilar es equivalente, pero con la dificultad añadida de que es necesario que alcance hasta la base, situada generalmente a unos tres metros del operario.

Hecho todo lo anterior correctamente, siempre vigilando que ninguna de las operaciones varíe los valores métricos anteriores, verticalidad, separación de las armaduras, etc., el material estará en condiciones de alcanzar homogéneamente la resistencia prevista. Lo cual ocurrirá definitivamente si con la operación siguiente, denominada curado, mantenemos las condiciones de humedad óptimas para su fraguado. El calor que desprende la reacción de fraguado y el calor del ambiente favorecen la evaporación y la consecuente falta de agua. Generalmente, es preciso añadir agua mediante riego, operación que debe ser más frecuente si se dan temperaturas elevadas. En caso de heladas es mejor no hormigonar o bien proteger las obras efectuadas mediante lonas o medios similares. El frío puede impedir el proceso de fraguado y si es muy intenso congela el agua si el hormigón es reciente.

La última operación es retirar lo encofrados. En el caso de los pilares es posible hacerlo al cabo de dos o tres días, ya que el pilar no está sometido a ningún tipo de acción gravitatoria que no sea su propio peso. Sin embargo, en el caso de los forjados es preciso retrasar bastante esta operación, ya que, suprimido el encofrado, el forjado ha de soportar casi toda la carga definitiva, es decir, su peso propio. En un edificio de varias plantas, los forjados más bajos, debido al orden lógico de ejecución de las plantas, deben soportar además el peso de varios forjados superiores cuyos encofrados se apoyan en ellos.

Si el hormigón debe quedar visto, sólo cuando retiremos el encofrado podremos comprobar si su color, textura y dibujo son los deseados.

Como se ha podido comprobar, la puesta en obra de un elemento de hormigón consta de operaciones elementales coordinadas entre sí, pero que cabe clasificar de manera nítida según tengan como objetivo cuestiones de forma o cuestiones de propiedades intrínsecas del material. En el caso del muro de ladrillo, las operaciones están mucho más mezcladas e incluso algunas responden a los dos objetivos simultáneamente. Lo cual requiere mucha más habilidad y experiencia por parte de los operarios. Es decir, la albañilería es una técnica menos industrializada que la hormigonería. Veámoslo.



El albañil finaliza la operación de colocar el primer ladrillo de la hilada. El límite lateral del muro en ejecución y su verticalidad quedan controlados por el reglón colocado a plomo previamente a todas las operaciones. El nivel de las hiladas se controla con el cordel fijado a dos reglones que se denomina tendel.



El albañil ya ha extendido el mortero del segundo ladrillo y está enlardando su testa con el fin de colmatar la llaga una vez colocado.

Procesos con materiales conformados

El muro de ladrillo

La técnica del hormigón armado consigue la continuidad de la materia mediante unas operaciones (colocación de las armaduras, vertido, etc.), que son en realidad bastante sencillas. No es así en el caso del muro de ladrillo.

En primer lugar, es preciso recordar lo dicho en I-1 y líneas arriba en este mismo tema sobre la necesidad de que cualquier muro, sea portante o no, resuelva la propia continuidad de su material y el máximo reparto de las cargas mediante el aparejo o la disposición relativa de las piezas entre sí. Pero eso es insuficiente, ya que las piezas han de estar conectadas efectivamente entre sí, tanto para transmitir correctamente los esfuerzos mecánicos como para crear una barrera estanca al agua. Como veremos, todo ello depende directamente de la destreza y el estado de ánimo del operario.

La primera operación lógicamente será el replanteo del muro, marcando, en la superficie donde va apoyado, alguna de las dos líneas que lo definen, y controlando la horizontalidad y la cota de nivel de aquélla. Si es un forjado de hormigón sobre el que vamos a construir un muro de fachada, es bastante probable que sea

horizontal. Sin embargo, si estamos construyendo las primeras hiladas de un muro apoyado en un cimiento, será lo contrario, lo que requerirá algún recrecido suplementario o algún repicado.

Para iniciar la colocación de los ladrillos es preciso controlar dos variables de la forma, la verticalidad del muro y la horizontalidad de las hiladas, variables importantes cuando queda escondido por un revoque o un aplacado, y absolutamente claves cuando el ladrillo queda visto.

La verticalidad se obtiene mediante los reglones que el albañil ha de situar en ángulos y rincones por diversos procedimientos a plomo, es decir, verticales, de manera que además le sirvan para fijar en ellas el cordel, denominado tendel, que le permitirá controlar la horizontalidad de las hiladas.

Pero, previamente, habrá sido necesario realizar el mortero con la dosificación establecida habitualmente en este caso, un volumen de cemento portland por cuatro de arena y el agua correspondiente para que sea trabajable. Es una de las operaciones clave en la consecución de las propiedades intrínsecas que menos se controla habitualmente.

Imaginemos que ya se han ejecutado varias hiladas. Veamos la operación de colocar el ladrillo. El gesto del operario, denominado res-



Después de la operación del restregón, el albañil ha conseguido colocar a la primera en el sitio que le corresponde el ladrillo colmatando la junta horizontal o tendel y la llaga.



La operación finaliza cuando presionando hacia abajo el ladrillo consigue colocarlo definitivamente en su nivel y retira el mortero sobrante, prueba inequívoca de que el tendel está colmatado.

tregón, ha de conseguir, simultáneamente, varios objetivos con relación a la forma y a las propiedades de la fábrica en su conjunto:

- el ladrillo ha de quedar justo en el nivel y situación en planta previstos, dejando la junta horizontal o tendel con el espesor indicado,
- la junta vertical, o llaga, a plomo con la que tiene dos hiladas más abajo,
- las dos juntas han de quedar totalmente colmatadas de mortero, de manera que no pueda entrar agua, y el contacto entre ladrillos sea total y homogéneo,
- la adherencia entre el mortero y el ladrillo ha de ser máxima con tal de dar coherencia al todo el conjunto,
- para garantizar totalmente la estanquidad debe humedecer previamente los ladrillos para que no absorban parte del agua del mortero, lo que impediría que fraguase el cemento portland más próximo o en contacto con el ladrillo, lo cual supone indefectiblemente una vía de entrada de agua y falta de adherencia,
- cuando ya están colocadas varias piezas, es preciso proceder a dar forma definitiva a la junta, especialmente en su cara exterior; tal como se comenta en III-7.2, esta forma es trascendente con relación a la impermeabilidad respecto al agua,
- si el operario se equivoca y no coloca el ladrillo en su lugar a la primera es preciso que

vuelva a iniciar toda la operación, pero sin utilizar el mortero del primer intento.

Es evidente que la influencia del factor humano en la construcción del muro es mucho más elevada que la de la construcción en hormigón armado. En este caso, el producto final es consecuencia de unas operaciones métricas, un material correctamente realizado en la central hormigonera y unas operaciones de control de su puesta en obra relativamente sencillas y descompuestas en operaciones sucesivas. Por contra, la construcción del muro de ladrillo requiere una destreza que incluye la realización del propio mortero, para la cual es preciso un aprendizaje más o menos largo y habilidad y capacidad personales.

La comparación queda completa si se contrasta la cantidad de veces que se realiza la operación del restregón en un metro cúbico de obra de ladrillo, unas 400 veces, con las operaciones necesarias para realizar un metro cúbico de hormigón, bastantes menos y mucho más sencillas.

Se da, en definitiva, la paradoja de que es más fiable una estructura de hormigón armado en la que el 90 % del material se ha elaborado totalmente en obra, que una estructura en la que el 80 % del material, el ladrillo, viene con-

trolado de fábrica. Ésta es una de las razones, aunque no la única (recuérdese todo lo dicho sobre flexibilidad de uso), que hacen preferibles las estructuras de hormigón armado. Es un ejemplo de industrialización que no pasa por la prefabricación, sino por lo contrario.

• • •

La evolución de las técnicas de puesta en obra tiende a incentivar las operaciones que no requieren destreza, y reducir los procesos a montajes de piezas de gran tamaño de las cuales lo único que hay que dominar son sus variables geométricas de posición, cota, replanteo, verticalidad, etc., es decir la construcción prefabricada. Sin embargo, por las razones expuestas en el apartado anterior, estas técnicas plantean nuevas dificultades que parecen ser más capaces de resolver las técnicas de adición de pequeños elementos con todos sus inconvenientes.

El estudio de los elementos que se desarrollan en la segundo tomo de esta obra sirve también para comprobar la influencia de los diferentes tipos de técnicas de puesta en obra en las diferentes soluciones que existen para materializar los distintos elementos del edificio.

La referencia al tipo de técnica de puesta en obra, moldeado o tendido de materiales amorfos, adición de pequeños elementos, o colocación de semiproductos o componentes, es imprescindible para entender las maneras actuales de concebir y materializar, es decir, construir edificios.

Pero, y esto es importante, también para entender los criterios que permiten analizar la primera de las cuestiones subjetivas y no cuantificables que definen la conveniencia estética, es decir, la plástica de los materiales. Veámoslo.

CAPÍTULO V. **Estética**

El principio de conveniencia estética

Este quinto capítulo tiene por objeto dar una visión general de las relaciones que se establecen entre los principios cuantificables explicados en los capítulos anteriores y lo que convierte una mera construcción en obra de arquitectura. Es decir, todo aquello que lleva a que los espacios contruidos para la satisfacción de las necesidades prácticas no se agoten en esa satisfacción, sino que además dejen en el usuario la impronta de una serie de valores que trascienden el mero uso (deleite, emoción, comunicación, expresión, etc.), que podemos denominar valores del arte.

La intensidad y significación de estos valores son cambiantes, pues están sometidas a los avatares de la cultura; pero, y esto es lo específico del construir arquitectónico, en ningún caso han de entrar en conflicto con su finalidad fundamental: el uso a corto y a largo plazo de los espacios que produce.

A este modo de cumplir la finalidad del uso lo denominamos aquí conveniencia estética, entendiendo por estética esa cierta relación cultural a la vez actual y trascendente del sujeto con el objeto, es decir, del usuario con la obra de arquitectura. Puesto que esta relación no sólo no debe interferir en el uso, sino potenciarlo, se califica de conveniente, es decir, que está de acuerdo con el estado, situación, deseo o gusto del usuario.

La relación entre uso y conveniencia estética es totalmente simétrica. Por un lado, si se quiere hacer una obra de arquitectura, el cumplimiento de los principios cuantificables es totalmente insuficiente, ya que los elementos o soluciones que los satisfacen escuetamente no

son siempre formas válidas por sí mismas desde el punto de vista de la percepción estética. Es necesario añadir toda una serie de valores plásticos y expresivos para que sean plenamente satisfactorios.

En el fondo se está negando uno de los aforismos más difundidos de la primera arquitectura del siglo xx: “la forma sigue a la función” (se ha de entender la función utilitaria). La realidad es que ni los que lo enunciaron lo aplicaron literalmente, sino que siempre sus creaciones estuvieron afectadas de una determinada “estética funcional” independiente del cumplimiento estricto de esa función básica.

Desde el otro lado se constata el aserto simétrico y complementario. La consecución de la conveniencia estética, en el caso de la arquitectura, ha de ir indisolublemente ligada al cumplimiento de los objetivos cuantificables y está condicionada así mismo por los procesos de producción. La tesis que se defiende en este libro es que la estética arquitectónica se basa, aunque lo trasciende, en el cumplimiento de los cuatro principios cuantificables, y no puede entenderse por sí misma como puede ocurrir en la pintura o la escultura.

Pero se ha de destacar también que, en este texto, no se postula que la belleza sea una cualidad a añadir al final de un proceso en el ya han sido resueltas las razones cuantificables. La tesis que se defiende es que el proceso creativo del arquitecto en la fase imaginativa ha de operar (mediante procedimientos que no se van a desarrollar aquí) en la consideración conjunta de todos los tipos de razones, de manera que los artefactos arquitectónicos surjan de la resolución simultánea de los problemas prácticos y la conveniencia estética.

Pero, obviamente, la resolución de esta integración no está exenta de numerosas dificultades, ya que los requerimientos, considerados aisladamente, muchas veces exigen soluciones contradictorias; por ejemplo, una determinada forma expresiva cubista estricta entra en contradicción con la expulsión de agua tanto en la cubierta como en las fachadas, con la multitud de problemas de diferente tipo que ello comporta. Éste sería un caso de inconveniencia estética.

De hecho, estas dificultades son comunes a la integración de todos los requisitos sean los que fueren. Ya se ha hecho referencia a lo largo de los capítulos anteriores a los conflictos entre la resolución de los requisitos, por ejemplo, de tipo térmico con los de tipo acústico o los de tipo acústico con los de ventilación. Y, tal como también se ha dicho en la Introducción de los Principios, el proceso de generación de la forma en la fase imaginativa y proyectual es un proceso difícil en el que se deben resolver estas contradicciones mediante soluciones intermedias o de acuerdo o de pacto que reúnan el máximo de prestaciones positivas y el mínimo de exigencias resueltas insatisfactoriamente o irresueltas.

Sin embargo, se puede decir que la contradicción que mayores dificultades potenciales crea es la que enfrenta la conveniencia estética con los principios cuantificables.

El presente capítulo, mediante la exposición de casos concretos, pretende destacar las relaciones más habituales que pueden llegar a producir acuerdos positivos o conflictos, sugiriendo métodos para evitar los segundos.

En la Introducción a los Principios ya se ha dicho que los objetivos generales se traducen en numerosas y diversas condiciones, que denominamos requisitos, que según su naturaleza dependen de una o más variables. Uno de los aspectos claves a determinar ahora es precisamente cuáles son las variables de las que depende la conveniencia estética.

También se ha dicho que la satisfacción de las variables de los requisitos exige unos modos de comportamiento, que denominamos exigencias, las cuales deben estar cumplimentadas mediante las prestaciones que las soluciones concretas aportan.

Y es precisamente en la definición de las exigencias donde se establece claramente la diferencia entre este capítulo con los anteriores. En éstos es posible establecer los valores que definen el correcto cumplimiento de la exigencia, como por ejemplo, cuando hemos hablado del aislamiento entre dos viviendas contiguas, hemos considerado que el mínimo óptimo está en alrededor de los 50 dBA; la solución correcta será aquella que aporte esa cantidad en su aislamiento como consecuencia de sus características de forma y material.

La diferencia, en cuanto a la exigencia estética, es que sus valores no dependen de razonamientos objetivos y cuantificables, ya que pertenecen precisamente al dominio de los valores del arte, difícilmente cuantificables. Aquí sólo se trata de definir aquellas variables propias de la materia del edificio de las que depende el valor expresivo o emotivo. Éste es sin duda un terreno resbaladizo en el que existen infinidad de teorías contrapuestas; sin embargo, existe una constatación difícilmente discutible: casi todas estas variables están relacionadas con la visión del edificio, es decir, son variables percibibles principalmente a través de la vista (sin desdeñar los otros sentidos), y habrá que referirlas, en consecuencia, a las características visuales de las dos claves constantes del construir: la forma y el material.

La forma queda definida por su contorno, por su perfil y por los volúmenes que puedan percibirse en la tercera dimensión perpendicular al observador, y todo condicionado por la iluminación existente.

El material queda definido por las características visuales de sus superficies, compuesta fundamentalmente por dos variables: el color y la textura. Pero, como consecuencia de la complejidad de cualquier material de construcción, hay que añadir el dibujo formado por líneas de separación entre diferentes colores y texturas propias de los diferentes materiales, o huellas inevitables de la puesta en obra u otras razones. La iluminación también será un factor más en juego. En definitiva, las variables que dependen de las superficies definidas por el material son el color, la textura y el dibujo, a las que denominaremos variables plásticas por su similitud a las equivalentes de la pintura y la escultura.

Un factor de otro orden, que no hay que olvidar, condiciona todo ello: la experiencia y conocimiento del observador, que será lo que dará un significado u otro a cada una de las variables.

Para tipificar las posibles relaciones que se puedan establecer entre los ámbitos cuantificables y los subjetivos, en este libro se clasifican en dos grandes grupos: las que podemos denominar dialéctico-creativas y las no dialécticas.

Con el primer término compuesto se indica la relación, ya comentada en las líneas anteriores, que se establece entre los principios cuantificables (las razones prácticas y las razones de la producción) y las razones estéticas cuando se establece entre ellos una relación de diálogo, de intercambio, de conjunción de intereses y de pactos mutuos que facilitan la resolución de todos los problemas.

El proceso creativo, una vez esbozado el elemento constructivo según las razones prácticas, ha de involucrar inmediatamente la conveniencia estética, cuya influencia ha de quedar a su vez mediatizada de nuevo por las primeras y así sucesivamente hasta llegar a un elemento final válido en todos los aspectos, compuesto por una forma y un material que son la consecuencia de un pacto entre requerimientos tal vez inicialmente contrapuestos.

Tampoco se ha de creer que siempre es necesario recorrer ese proceso desde cero, pues la mayoría de las veces es suficiente acudir al repertorio de elementos consolidados por una larga experiencia, tales como la mayoría de los expuestos en el tomo II, en los que se da de entrada el acuerdo entre todos los requerimientos. La complejidad del proceso aumenta con el grado de originalidad que se exija a la obra arquitectónica.

Las relaciones serán no dialécticas en los casos en que el elemento arquitectónico es consecuencia sólo de un grupo de razones, o bien las cuantificables o bien las expresivas, y no se establece, al menos con intensidad, ninguna relación entre los diferentes grupos de razones. Puede ser una relación no conflictiva de manera que la forma arquitectónica generada a partir de un valor estético no interfiera las razo-

nes prácticas; o bien pueden darse conflictos que, a su vez, pueden ser resolubles o irresolubles. Entre éstos se han de distinguir los que son resolubles mediante una innovación técnica y los que son realmente irresolubles. Los ejemplos que se exponen líneas adelante aclaran estos conceptos.

El tema 15 analiza las relaciones con los procesos de producción. El 16 con los objetivos cuantificables o razones prácticas.

En los dos se hacen bastantes referencias a la arquitectura histórica por dos razones.

Primera, para destacar la intemporalidad de algunos requisitos y de los principios generales para darles solución, vigentes tanto unos como otros ahora y hace siglos.

Segunda, para destacar lo contrario (es decir, la falta de vigencia) en las soluciones históricas concretas y que, por otro lado, en el discurrir de la historia más reciente, surgen nuevos requisitos que exigen nuevas soluciones.

La comparación con un pasado relativamente reciente permite ver la ingente tarea que la arquitectura del siglo xx ha tenido que realizar para encontrar nuevas respuestas a las nuevas situaciones culturales, sociales, técnicas, económicas, etc., tan diferentes de las de los siglos anteriores. Es una tarea en la que, si bien en la mayoría de las asignaturas las notas son elevadas, a pesar de todo, quedan algunas asignaturas pendientes. Esperemos que la del siglo xxi las apruebe definitivamente. Veamos algunas de unas y otras por medio de ejemplos.

TEMA 15. Técnicas de producción y conveniencia estética

PROCESOS DE PRODUCCIÓN Y VARIABLES DE LA PERCEPCIÓN ESTÉTICA

TÉCNICAS TRADICIONALES Y CONVENIENCIA ESTÉTICA

Adición de pequeños elementos

Fábricas de ladrillo, piedra, mixtas y bloque de hormigón

Revestimientos de baldosas

Cubiertas de tejas

Tendido de materiales amorfos

Enyesados

Revoques, estucados y monocapas

Pavimentos continuos

TÉCNICAS CONTEMPORÁNEAS Y CONVENIENCIA ESTÉTICA

Moldeo de materiales amorfos

Hormigón armado in situ

Construcción seca con componentes

Placas de piedra ancladas

Piezas de hormigón moldeado en taller

Paneles de hormigón aplacados

El acero

El vidrio

PROCESOS DE PRODUCCIÓN Y VARIABLES DE LA PERCEPCIÓN ESTÉTICA

El objetivo de este tema es destacar, mediante algunos pocos ejemplos representativos, cómo las variables que determinan los efectos estéticos quedan influidas por los diferentes procesos de producción, poniendo de manifiesto que las propuestas estéticas pueden estar en relación dialéctico-positiva o en conflicto con ellos.

La tesis defendida en este libro es que en la inmensa mayoría de los casos la primera es la postura correcta. Pero no se niega que en alguna ocasión, en la que domine una razón no objetivable, pueda ser la contraria. Pero lo que es del todo inadmisibles es que los conflictos se produzcan por desconocimiento de los que tienen capacidad de decisión en el diseño arquitectónico.

Un conflicto entre un objetivo estético y el proceso de producción puede darse cuando el objetivo estético presenta dificultades de consecución, es decir, o que es poco factible, o que requiere un exceso de inversión económica como consecuencia de su complejidad, de la dificultad de encontrar los materiales, de su elaboración, de su colocación, etc.

Cada uno de los procedimientos de producción de elementos, como se ha visto en I-14, tiene un repertorio de formas y superficies (color, textura y dibujo) que pueden ordenarse según su factibilidad, desde las fáciles, inmediatas, o "naturales", hasta las más complejas o de difícil realización.

La clave para evitar los conflictos está en situar nuestras propuestas estéticas, formales o plásticas lo más cercanas a esos resultados "naturales" de los procesos de producción, intentando, además, sacarles el máximo prove-

cho. Es lo que ha hecho la arquitectura en la práctica totalidad de su historia. Un muro de ladrillo satisfactorio desde el punto de vista estético, está habitualmente en relación dialéctico-creativa tanto con el método de producción de la unidad ladrillo y el mortero, como con el de la puesta en obra de ambos formando el aparejo correspondiente.

Tal como se ha justificado en la introducción al capítulo, en el desarrollo del tema se introduce una división basada en la evolución histórica reciente de los procesos de producción de edificios, distinguiendo las técnicas propias de la arquitectura anterior al siglo xx, que denominaremos tradicionales (principalmente adición de pequeños elementos), y las surgidas en ese siglo que están en la base de la arquitectura moderna (hormigón armado y acero) y que denominaremos contemporáneas.

La distinción es pertinente ya que muchas (por supuesto, no todas) de las propuestas estéticas de la arquitectura moderna surgidas en las primeras décadas del siglo xx, y que buscan una ruptura con el pasado clásico, se basan precisamente en la generación de formas imposibles de alcanzar con las técnicas tradicionales, tales como las que se han visto al final de I-2. En el siglo xx, la exhibición de la innovación técnica, más o menos real o retórica, pasa a tener, y sigue teniendo, un papel que no había tenido nunca a lo largo de la historia de la arquitectura. Sin duda, es uno de los rasgos destacados, aunque ni mucho menos el único, de la modernidad.

Por otro lado, no se ha de pensar que las técnicas contemporáneas han hecho desaparecer tradiciones, sino que éstas, adaptadas al siglo xx, siguen siendo muy capaces de producir la mejor arquitectura moderna. Los ejemplos seleccionados son mayoritariamente actuales y los pocos del pasado se presentan no como casos a imitar directamente, sino como ejemplos que concretan una idea.

A pesar de que el tema se centra en las técnicas de producción, en algún momento se hacen referencias a las razones prácticas (y a la inversa en I-16) ya que, como se ha dicho en muchas ocasiones, todo está relacionado con todo, y olvidarlo impide la comprensión de muchas cosas.

TÉCNICAS TRADICIONALES Y CONVENIENCIA ESTÉTICA

Adición de pequeños elementos

No existe una relación causa-efecto entre este sistema de producción y los diferentes estilos arquitectónicos anteriores al siglo xx. De hecho, mediante la adición de pequeños elementos podemos llegar a estilos arquitectónicos muy diferentes, como el clásico, o también a otros voluntariamente anticlásicos, como el modernista, o, en otras épocas, también dan lugar a otros métodos expresivos como el gótico, el románico y bastantes más si sobrepasamos el ámbito occidental.

Todos estos estilos están basados en las posibilidades formales y plásticas de los materiales pétreos, naturales o artificiales, en sus diversas escalas de análisis.

La escala de edificio permite ver que, en parte independientemente del material concreto, las formas son las que reaccionan frente a los embates externos, gravedad, sismos, viento, con el único recurso de la resistencia a compresión de la fábrica. Es decir, las formas generales del sistema de muros, con fachadas portantes o bóvedas con todos los elementos de contrarresto que necesita el equilibrio de sus empujes, son parecidas tanto si son de piedra como de ladrillo.

La escala de detalle permite ver que las formas concretas dependen mucho más del material. Si éste es piedra, son factibles además, infinidad de elementos de ornamentación, molduras, etc., que surgen del trabajo del cantero, aunque es una posibilidad que no se aprovecha apenas en los cánones estéticos modernos.

Si es ladrillo, las formas son las que podemos configurar mediante los aparejos y sus combinaciones más o menos complejas.

El color y la textura de las superficies son consecuencia de cada uno de los dos materiales básicos, es decir, el pequeño elemento, que puede ser ladrillo, piedra o cualquier otro, y el otro material, que es el mortero con todas las variables que dependen de él. El dibujo será consecuencia de cómo se relacionan geométricamente los morteros y las piezas. Veámoslo en cada uno de los casos más habituales.

Fábrica de ladrillo

El repertorio de formas posibles realizadas con fábrica de ladrillo, como se comprueba con algunas obras de la arquitectura anterior al siglo xx, es realmente amplio. Las formas más usuales en la actualidad son bastante más sencillas, y la expresividad de la fábrica se basa sobre todo en el color del ladrillo y sólo en algunos casos en variantes de los aparejos usuales

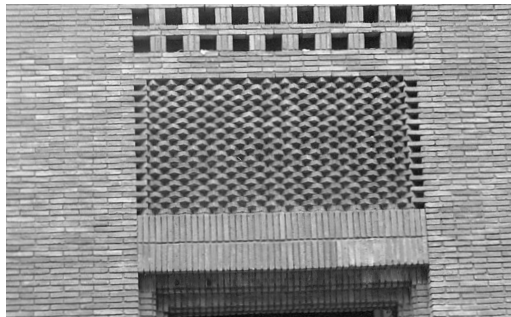


Algunas de las posibilidades formales de la fábrica de ladrillo.

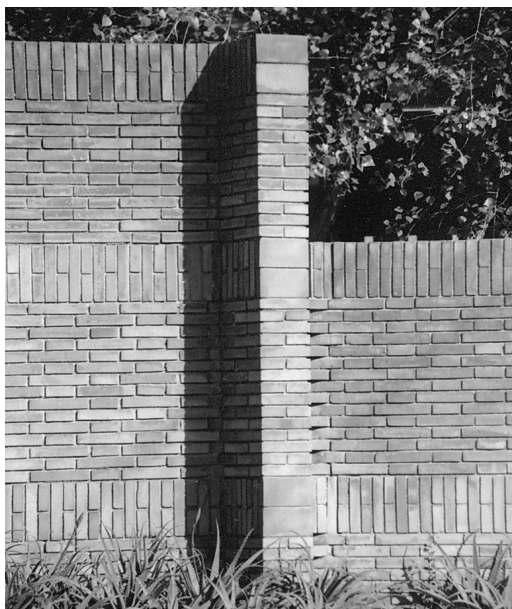
o en el contraste de colores entre ladrillos o entre éstos y el mortero.

El color es consecuencia de las arcillas con las que se ha hecho el ladrillo, pero también del proceso de cocción como ya se ha comentado antes. La paleta de colores, siempre térreos, es relativamente amplia.

La textura será consecuencia del método de producción que le ha dado la forma, bien por extrusión o bien por moldeo, que quedará



Puerta de acceso a un edificio público realizada por diversas variantes del aparejo.



Cerca de cierre actual con cierta riqueza en la forma y el aparejo.



Otro lugar y otro punto de vista de la cerca anterior. El giro contrapuesto de los extremos de los dos lienzos de la cerca, además de añadir estabilidad, resuelve creativamente el problema de las dilataciones térmicas.

también afectado por el proceso de cocción. Si el ladrillo es el resultado de una producción industrializada, habitualmente será una pieza de una gran regularidad geométrica; si el ladrillo se hace con un método de producción artesanal, esta regularidad será menor.

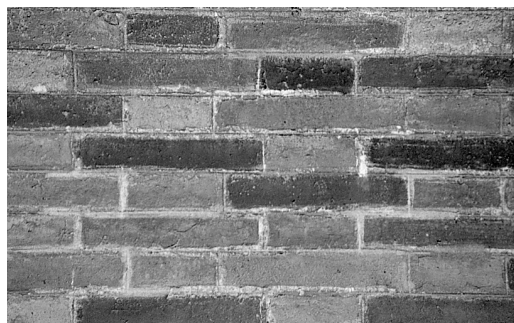
La percepción del mortero será sobre todo la de su color según que el conglomerante sea cemento o cal y, aunque en menor medida, por el color de los áridos.

Habitualmente, los morteros son de color gris, que es el de los cementos portland. Si queremos obtener algún efecto plástico derivado del color, será necesario utilizar cal o cementos portland blancos, y, además de escoger los áridos adecuados, añadir colorantes minerales.

El dibujo general del paramento del muro es consecuencia del aparejo con que está construido, a sogas, a tizón, etc. La forma dada

a la junta también incidirá en la percepción general. El mortero puede estar enrasado con los paramentos del ladrillo o bien estar retrasado y producir una línea de sombra.

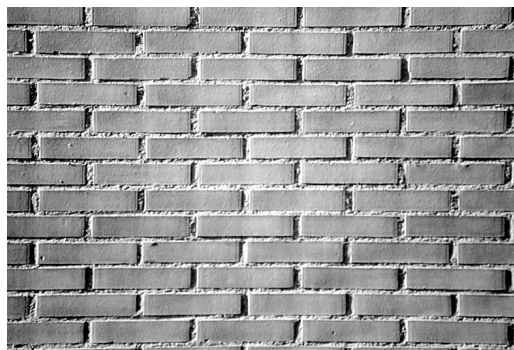
Puesto que los aparejos son consecuencia de los objetivos de estabilidad y de estanquidad del muro, por medio de estos aparejos se establece una relación entre el efecto plástico del material y el cumplimiento de las razones prácticas. Puede suceder que una decisión tomada desde el punto de vista plástico pueda entrar en conflicto con los objetivos cuantificables, como sería suprimir el rompejuntas en una pared portante o, por ejemplo, no llenar las llagas de mortero en una pared exterior, que originarían una falta de trabazón en el primer caso y de estanquidad en el segundo. Ambos son ejemplos de propuestas estéticas inconvenientes.



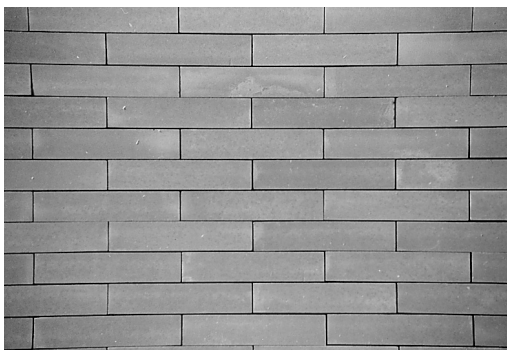
Aparejo flamenco de un edificio decimonónico en el que se constata la irregularidad de la producción del ladrillo y el mortero de cal enrasado de las juntas.



Aparejo de sogas en el que se ha enrasado la llaga y rehundido el tendel con el fin de obtener un efecto plástico de dominio de la horizontalidad de las hiladas.



Aparejo de sogas de ladrillo mecánico actual con las juntas algo rehundidas.



Si se utilizan ladrillos agramilados, es decir, con las tablas rehundidas para alojar el mortero, la apariencia es de una fábrica a hueso, es decir, sin mortero.

Fábrica de piedra

Las variables a analizar serán las formas de los elementos (sillares, sillarejos o mampuestos) y su constitución geológica, que influirá en el color general, en la homogeneidad y en las posibles texturas finales. No es lo mismo un mármol blanco, una piedra calcárea, una arenisca o un granito. Los “métodos de producción de la naturaleza” influyen de una manera directa en la percepción final. Pero, además, la característica de piedra dura o blanda también influirá en las posibilidades del acabado superficial final o en la posibilidad de hacer molduras.

En el caso de los muros realizados con sillares, el mortero no es aparente y el efecto plástico sólo dependerá de la misma piedra y del dibujo que hacen las juntas. Si las piezas son sillarejos, el aparejo habitualmente es más irregular. Si es mampostería cambia todo, ya que los mampuestos son de una gran irregularidad y el mortero llega a tener mucha más presencia.



Fabrica de mampostería actual.

Fábricas mixtas

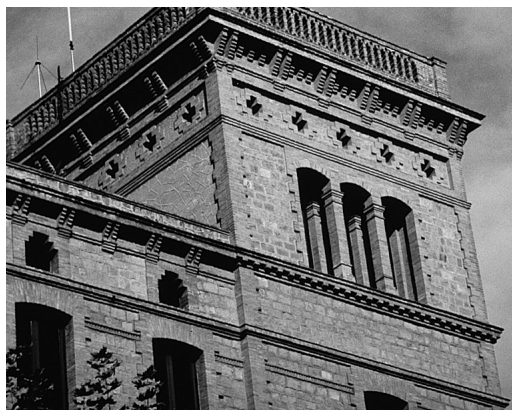
En ellas se pueden combinar los dos elementos que hemos visto hasta ahora, piedra, ladrillo o bloque. En la construcción tradicional tenemos las fábricas mixtas de piedra y mampostería, o ladrillo y mampostería, en las que la piedra o el ladrillo se colocaba en las partes de los muros donde era necesario hacer aristas, como las esquinas, las jambas o las verdugadas.



Fábrica decimonónica de sillares de piedra arenisca que permite con facilidad la realización de molduras.



Fábrica, algo posterior en el tiempo a la anterior, de sillarejos de piedra caliza dura más difíciles de trabajar.



Fabrica mixta decimonónica que combina los sillarejos en los paramentos generales con la fábrica de ladrillo en los elementos que requieren mayor regularidad geométrica, cornisas, impostas, jambas, etc.

Fábrica de bloque de hormigón

La variable dominante pasa a ser la forma y textura de la cara vista del bloque y su color, ya que la presencia del mortero es pequeña y la forma general del bloque prácticamente siempre es la del rectángulo de 20×40 cm. Hay muchas variantes de la cara vista, ya que en el bloque se fabrica mediante moldeo en fábrica, aunque la más habitual es la lisa. La paleta de colores puede ser amplia ya que es posible utilizar cemento portland blanco y colorantes adecuados. Las combinaciones de bloques de diferentes colores también es un recurso que puede aportar buenos resultados.



Muro de bloques de hormigón de tamaño algo superior al normal resuelto con un simple aparejo de sogas, pero con dos hiladas sin solapar. Con este sencillo recurso, que no afecta a la continuidad mecánica ya que los bloques van armados verticalmente, se consigue un efecto plástico muy superior al del aparejo simple. Adviértase en primer plano una cubierta de tejas planas esmaltadas que vuelve a aparecer más adelante.

Revestimientos de baldosas

Las variables son las mismas que hemos visto hasta ahora: la forma general de la propia baldosa, su superficie vista, el color y la textura, el dibujo del aparejo y, con menos incidencia, el mortero que pueda haber en las juntas.

Es un recurso habitual para resolver fachadas que, como se comenta en III-7.2, si no se previenen correctamente los posibles movimientos diferenciales de todos los tipos (I-11)



Volúmenes de directriz cilíndrica revestidos por una plaqueta alargada.



Paramentos planos revestidos con el mismo tipo de plaqueta, con una junta de dilatación del propio revestimiento.

que se producen entre el revestimiento y su soporte, puede plantear serios conflictos. Lo cual no quiere decir que no sea recomendable su utilización, pero sí delicada. Los buenos ejemplos son numerosos.

Si la baldosa es de formato alargado (plaquetas) y se coloca en vertical, los revestimientos se pueden adaptar a superficies cilíndricas con buenos resultados formales.

En paramentos planos, una simple junta de dilatación bien resuelta puede ser una aportación de gran valor.

Pero si su uso es problemático en las fachadas, es habitual en pavimentos. Podemos comparar dos casos extremos en cuanto a resultados plásticos: un suelo de gres cerámico y otro de terrazo.



Pavimento de baldosas cerámicas.



Pavimento de baldosas de terrazo pulido in situ.

La percepción de las baldosas cerámicas viene condicionada por el color de la cerámica, color que, por otro lado, no es único ya que, además de haber diferencias entre las baldosas, dentro de cada baldosa se pueden encontrar matices del mismo color, con degradaciones tonales hacia el claro o hacia el más oscuro en función de la cocción de la pieza. La textura no es tan lisa como la de un terrazo, pero tampoco tan rugosa como podría ser un pavimento mucho más rústico. Finalmente, el dibujo es consecuencia del hecho que son pequeños elementos puestos en obra por adición con una gran cantidad de juntas, que forman el aparejo o dibujo, que se llama en catalán “a la mescla”, dibujo que viene también resaltado por el color del mortero de las juntas.

La percepción del suelo de baldosas hormigón pulido es bien diferente. No hay casi dibujo ni textura, solo color y brillos especulares.

Los efectos respectivos sobre la percepción del espacio del cual son la base no son, evidentemente, irrelevantes.

La percepción del espacio siempre viene fuertemente condicionada por la plástica de sus revestimientos, lo cual puede ser un recurso para variarla. Un pavimento totalmente continuo hace más fluido el espacio, tal como se advierte líneas más adelante.

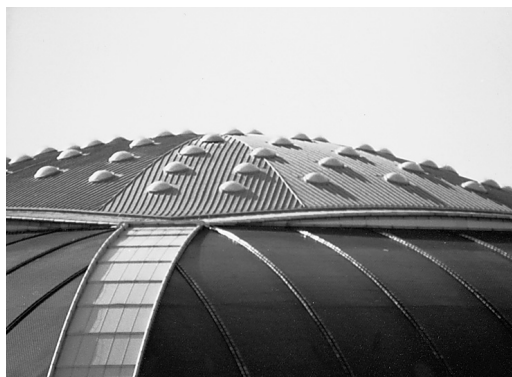
Cubiertas de tejas

Habitualmente, las tejas se toman con mortero, y puesto que éste queda oculto por la propia teja, o si están solo clavadas, la plástica del conjunto sólo depende de la forma de la teja, su concavidad y convexidad, si es plana o lomuda, su color y el aparejo o despiece general de todo el conjunto. Un recurso poco utilizado actualmente es la combinación de colores en las tejas que se puede conseguir cuando están acabadas con un esmalte.

Las cubiertas inclinadas con formas diferentes al plano, como las cilíndricas o de doble curvatura, pueden acabarse con piezas de tamaño reducido solapadas entre sí, a manera de escamas, clavadas sobre un soporte adecuado. La plástica del conjunto depende del perfil de la pieza, de su color y de la textura del revestimiento con que se acaban.



Cubierta de tejas planas esmaltadas.



Cubierta de doble curvatura resuelta en sus partes opacas con láminas de cinc en el casquete superior y con placas de cerámica esmaltadas solapadas.

Tendido de materiales amorfos

Debemos distinguir dos posibilidades cuando se hace un tendido en un paramento de fachada o de interior:

- el tendido es el último acabado del paramento y define sus características plásticas, por ejemplo, los estucados y los esgrafiados;
- el acabado final es una pintura sobre el tendido, que será la que defina las variables de color y textura. Es el caso de los tendidos de yeso o mortero de cemento portland, que se han de pintar.

En los dos casos, la forma general depende del paramento base.

Enyesados

Sus características plásticas se basan siempre en la absoluta continuidad y homogeneidad del tendido, que queda revestido por una pintura que es la que da el color y la textura final. Ahora bien, es importante destacar, por el contraste que presenta respecto a los morteros, que el yeso es una de las pocas pastas que una vez está extendida no requiere ningún tipo de junta, ya que no está sometida al fenómeno de retracción, sino más bien al contrario, y por eso podemos realizar superficies continuas, cosa que no ocurre con los tendidos de mortero.



Aspecto final de los paramentos de una compartimentación realizada con tabicones de directriz curva enyesados y esmaltados de blanco.

Revoques, estucados, y monocapas

Su expresión está condicionada por el fenómeno de la retracción, al que se ha de añadir el de las juntas de trabajo necesarias para subdividir los tramos de pared que se pueden ejecutar en una jornada. Todas estas razones hacen que los tendidos de mortero se tengan que subdividir mediante líneas. Lo habitual es intentar que tengan algún sentido dentro del conjunto de la fachada o del elemento que estamos recubriendo; por ejemplo, marcar las juntas de unos sillares, las impostas o prolongar las líneas de los dinteles de las ventanas, o mediante un dibujo independiente de cualquier episodio constructivo.



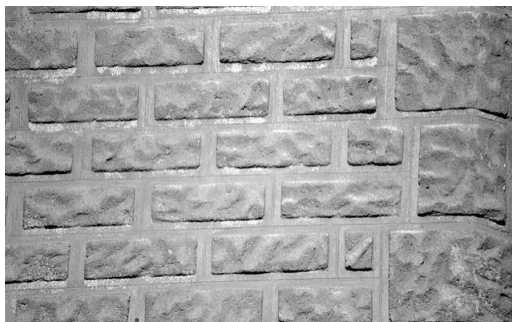
Estuco decimonónico que imita un despiece de sillares.



Estuco más moderno que no imita nada.

Históricamente, el papel de los tendidos de mortero en la plástica de las fachadas ha sido importantísimo, pero siempre partiendo de su capacidad de imitación. Mediante el tendido se ha podido imitar todo tipo de aparejos de silla-

res con los diferentes acabados con que se acostumbra a trabajar la piedra, tal como se puede ver en muchas fachadas construidas en épocas pasadas, que además resuelven automáticamente las dificultades citadas antes o las diferencias de lavado por el agua de lluvia.



Estuco decimonónico que imita con cierto éxito una sillería almohadillada rústica.

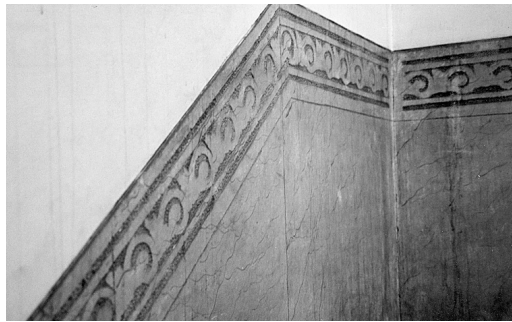
Pero también muchas de las realizaciones de la primera arquitectura moderna caen en la contradicción de utilizar los estucos más tradicionales para imitar una lisura, símbolo de una producción industrial prefabricada avanzada que evidentemente todavía no existía. Las fisuras producidas por los movimientos diferenciales entre cerramientos y estructura y falta total de elementos protectores contra el agua dieron como resultado unas fachadas muy sensibles a la intemperie y al paso del tiempo.



Edificio de la década de 1930 que no ha sido sometido a ningún proceso restaurador.

Con relación al color y a la textura, se ha de decir que con los estucos tradicionales (cal y áridos provenientes de la trituración de mármol y colorantes minerales) se pueden hacer todo

tipo de acabados e imitaciones de piedras. Si es para un interior, se puede hacer el denominado estuco en caliente, en el que además de las variables de color mencionadas anteriormente se consigue una textura absolutamente lisa y brillante mediante el planchado en caliente.



Arimadero de escalera de vecinos realizado con estuco planchado, con un remate esgrafiado, muy habitual en edificios de Barcelona del primer tercio del siglo xx.

Con dos capas superpuestas de diferentes colores se consigue el esgrafiado retirando parte de la capa exterior siguiendo un dibujo prefijado.



Esgrafiado modernista situado sobre un zócalo de sillería.

Actualmente, todas estas técnicas en su versión más tradicional están casi olvidadas y el acabado final de las fachadas con revestimiento continuo puede obtenerse por medio de:

- una capa de pintura sobre un revoque de mortero de cemento portland, o,
- nuevos procedimientos de tendidos basados en morteros modificados con resinas sintéticas denominados “monocapa”.

Las pinturas ofrecen innumerables posibilidades de colores y texturas que variarán también según el soporte sobre el que están extendidas o el tratamiento de la masa en su colocación.

La denominación de “monocapa” de los nuevos procedimientos que sustituyen los tendidos tradicionales destaca su diferencia principal respecto a éstos, que como mínimo requerían dos capas. Su técnica de puesta en obra no requiere tanta habilidad como la de los antiguos. En cualquier caso, los colores y las texturas también son consecuencia de la pasta y de los áridos, y también requieren el trazado de líneas que separen las diferentes zonas de trabajo y controlen la retracción.



Revestimiento monocapa de dos diferentes texturas con sus juntas de trabajo y retracción formando parte de la composición de la fachada.

Pavimentos continuos

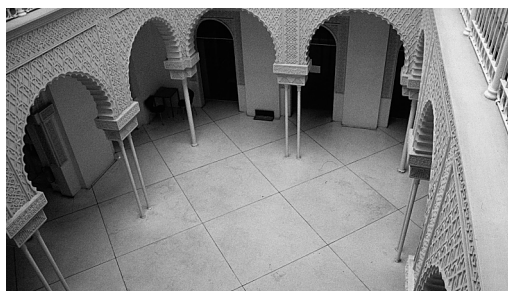
El hormigón es un buen material para realizar pavimentos peatonales exteriores en grandes superficies, pero tiene el inconveniente grave de su retracción, que fisura y agrieta la masa ya



Juntas de retracción resueltas por la interposición de bandas de baldosas de piedra forman parte de la composición global en la que también aparecen juntas serradas perpendiculares a las anteriores.

fraguada, lo cual provoca, además de un desagradable aspecto, una vía para la degradación por erosión. La solución pasa por utilizarlo en superficies pequeñas separadas entre sí por juntas de retracción que no tienen por qué ser juntas aserradas sino interponiendo otro tipo de material como hileras de adoquines o baldosas. La prevención de la retracción es en este caso un motivo para la obtención de unas superficies con cierta intención compositiva.

La utilización de estas juntas puede también reforzar determinadas intenciones espaciales.



Pavimento actual de terrazo blanco in situ realizado en un palacete decimonónico neomudéjar reconvertido en edificio público. Las juntas de retracción giradas 45°, desbordando los límites de los espacios domésticos originales, crean un espacio mucho más apropiado al nuevo uso del edificio.

TÉCNICAS CONTEMPORÁNEAS Y CONVENIENCIA ESTÉTICA

Moldeo de materiales amorfos

Hormigón armado in situ

Las formas posibles que se pueden dar a los elementos de hormigón armado in situ son casi ilimitadas, con los únicos límites de los propios encofrados.

El hormigón armado generó el cambio radical de la arquitectura moderna que se produjo en las tercera y cuarta décadas del siglo xx. Gracias a la posibilidad de hacer estructuras porticadas y forjados con luces más grandes, se interrumpe una manera de construir que había sido la única desde hacía siglos.

Este cambio tecnológico se produjo en parte con anterioridad cuando hizo su aparición de la construcción en hierro; pero no se producen cambios importantes en la expresión arquitectónica (aunque sí en la Ingeniería) hasta que no acontece la revolución plástico-expresiva de la década de 1920 asociada al hormigón armado.

Se pueden considerar representativos de este movimiento los “cinco puntos” de Le Corbusier, en los que se expone una voluntad de cambio de la expresión arquitectónica que se apoya en la técnica del hormigón armado. Cuatro puntos son consecuencia directa: la planta libre, dado que ya no es necesario hacer muros interiores; el edificio sobre *pilotis*, ya que no es necesario que los muros lleguen hasta los cimientos; la fachada no portante por la misma razón, y la ventana horizontal, como símbolo del carácter no portante de la fachada.

El quinto punto, suprimir las cubiertas inclinadas y sustituirlas por cubiertas planas ajardinadas, en realidad siempre había sido posible, pero si no era una práctica común no era porque no existiera el hormigón armado, sino por la falta de láminas impermeables con garantía suficiente. Se ha podido empezar a hacer terrados de una manera solvente a partir de la existencia de sistemas de impermeabilización durables.

Las variables que inciden en las cualidades plásticas de las superficies del hormigón in situ dependen de factores muy diferentes de los



Edificio emblemático de la primera arquitectura moderna en el que, entre otras muchas cosas tan interesantes o más, se encuentran aplicados los famosos cinco puntos.

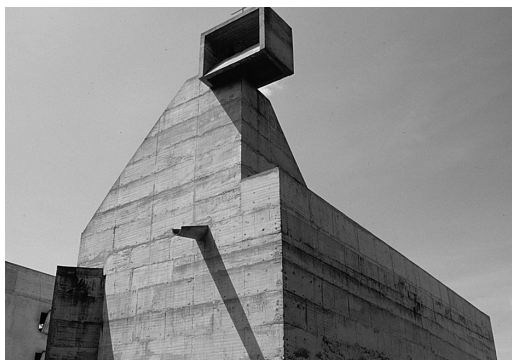
vistos en los casos anteriores, excepto el color, ya que el color del hormigón es lógicamente consecuencia del color del cemento y, en segundo lugar, de los áridos. Las otras variables son consecuencia del elemento clave del hormigón, el encofrado, que determinará la textura y el dibujo.

Debemos distinguir dos grandes grupos de encofrados que dan lugar a texturas y dibujos muy diferentes, los de madera y los metálicos.

En el primer caso, las superficies estancas y rígidas del encofrado se harán con la unión de tablas que dejarán entre sí unas juntas. Estos dos elementos serán los que determinarán claramente la textura y el dibujo del hormigón. De un lado, la misma textura superficial en que dominarán las vetas de la madera, y de otro lado, las juntas entre ellas que fijarán sus huellas sobre el paramento de hormigón. La textura final de un hormigón encofrado con madera es la de la madera.



Diferentes huellas del encofrado de madera sobre los paramentos de hormigón visto.



Volumen casi puro realizado con hormigón visto.

Si los encofrados son metálicos, esta combinación de variables cambia notablemente ya que los paneles tienen unas dimensiones muy grandes, las juntas entre piezas se alejan mucho, el dibujo general cambia notablemente y la textura del hormigón es lisa igual que la del panel metálico.

Otros elementos aparecen cuando realizamos grandes paramentos de hormigón, como los agujeros a través de los que pasan los tirantes para atar las dos caras del encofrado.

Si la plástica del edificio está basada en el hormigón, el arquitecto no sólo ha de hacer el proyecto de los elementos, sino que también tendrá que hacer el proyecto del encofrado, de manera que las señales que hayan quedado sobre el hormigón pasen a formar parte de la composición general del edificio; es decir, las líneas separadoras de dos paneles metálicos, o las líneas separadoras de dos fases de hormigonado entre dos jornadas de trabajo, han de estar armoniosamente integradas dentro de la composición general de la fachada o muro.

En cualquier caso, se ha de insistir en que el hormigón visto in situ es un procedimiento muy dificultoso y que raramente está libre de defectos, debido a muchos de los errores que se pueden producir a lo largo del proceso de hormigonado, que pueden provenir de la falta de estanquidad de los encofrados, que generan pérdidas de lechada que pueden ensuciar superficies ya acabadas de los elementos inferiores o la propia segregación de los áridos que dejará una zona de paramentos sin lechada y otras partes demasiado finas, etc.



Detalle de la textura en la que aparecen casi caóticamente todos los episodios del hormigonado. La intención expresiva y plástica brutalista de todo el edificio está en perfecta sintonía con esa textura.

La arquitectura moderna ofrece numerosos ejemplos de todas estas virtudes y defectos en bastantes de sus edificios emblemáticos, con una estética basada totalmente en la expresión plástica del hormigón, en la que las texturas de la madera y los dibujos derivados de los encofrados y de los procesos de vertido del hormigón son la base de la expresión general.

En cualquier caso, el hormigón visto siempre depara sorpresas cuando se retira el encofrado.



Contraste entre una textura que no puede dejar de ser subsidiaria de un cierto desorden en los episodios del hormigonado y una intención plástica global mucho más depurada.

Construcción seca con componentes

Si la construcción se hace con componentes, pocas cosas quedan por hacer en la obra y el proceso in situ se reduce al montaje mediante fijaciones, como tornillos o anclajes. Casi todas las variables de las que depende la expresión plástica del material son consecuencia de los procesos realizados en la fábrica o en el taller. En la obra sólo queda acabar las juntas entre piezas, que se tendrán que rejuntar en algunos casos con tal de dar estanquidad, y en otros casos quedarán vacías. El color y la textura se deberán al material y a su proceso de fabricación, y el dibujo, al tamaño máximo de las piezas o a los dibujos que incorporen sus superficies, con tal de hacer una composición u otra.

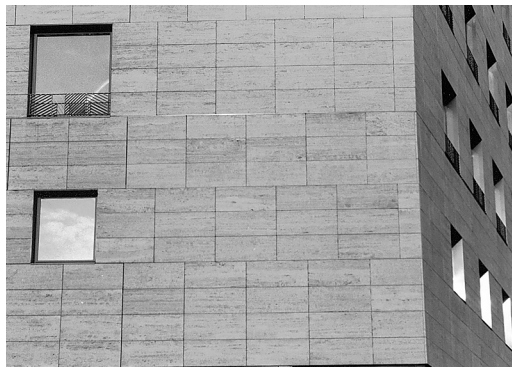
Placas de piedra ancladas

Las técnicas actuales de trabajo de las piedras nos permiten obtener unas placas relativamente delgadas con unos encajes en los cantos laterales que permiten fijarlas mediante anclajes en seco a los paramentos de ladrillo o de hormigón armado.

Detrás de las placas se deja una cámara de aire, de manera que el agua que pueda atravesar las piedras, gotear por detrás, y en la base ser expulsada hacia fuera. En consecuencia, tenemos unas placas de geometría perfecta con unas juntas vacías, que dan en conjunto una apariencia plástica muy diferente a la que nos tenía acostumbrados hasta ahora la piedra. No obstante, cabe rellenar las juntas con un



Despiece sencillo apropiado a una composición de fachada en la que dominan los huecos.



Despiece más complejo para una fachada con mayor proporción de llenos.

material de sellado diferente al mortero, como puede ser la silicona, lo que da un aspecto más cercano al de siempre.

El color y la textura son consecuencia del proceso geológico natural de formación de la piedra, sea calcárea, silíceo o granítica y el resultado del acabado superficial de las caras, liso, abujardado, flambeado, etc.

Piezas de hormigón moldeado en taller

El moldeado en el taller ofrece muchas más posibilidades que el realizado in situ, en cuanto a regularidad geométrica, texturas y colores. Por contra, la limitación vendrá dada por la dimensión máxima de las piezas para que sean transportables y la influencia de las juntas entre las piezas en el dibujo general. El elemento puede tener todo tipo de formas, desde los paneles planos de las construcciones prefabricadas de bloques de viviendas económicas, hasta las grandes piezas de hormigón de los edificios de inspiración clasicista o de cualquier otro tipo.

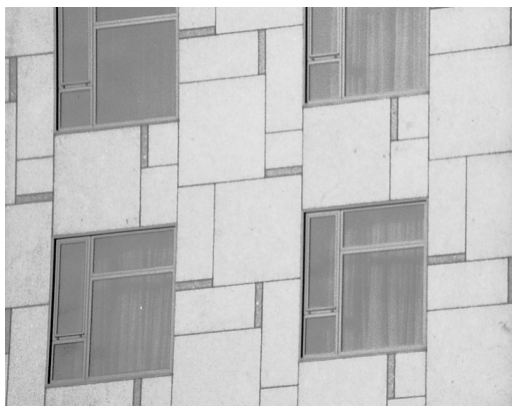
En cualquier caso, la plástica que depende de sus superficies tendrá todas las variables que ya hemos comentado antes respecto al hormigón in situ, el color del material, las texturas y los dibujos del encofrado, con la diferencia de que todo puede ser perfectamente controlable en el taller y podemos alcanzar niveles de perfección y homogeneidad imposibles en la construcción in situ.



Fachada que combina los paneles prefabricados de hormigón con otro tipo de materiales.

Paneles de hormigón aplacados

La combinación de las dos técnicas anteriores puede dar lugar a una manera de realizar fachadas con nuevas posibilidades en la composición del aplacado de piedra, imposible o muy difícil con otros procedimientos. La técnica consiste en revestir de placas de piedra los paneles de hormigón durante el mismo proceso de moldeado en taller. Sobre el fondo del molde se colocan las placas de piedra que ya disponen de sus fijaciones. Una vez fraguado el hormigón obtenemos un panel prefabricado revestido de piedra con todas las ventajas e inconvenientes, económicas y de producción, de la prefabricación, pero con una mayor libertad en la composición del aplacado que, obviamente, viene limitada por el tamaño del panel.



Composición de fachada casi imposible de conseguir con otro procedimiento que no sea el de los paneles aplacados en fondo de molde.

El acero

El acero, material fundamental en la construcción moderna, se puede presentar en la arquitectura en forma lineal, como vigas, riostras, jácenas, pies derechos, etc., o bien en forma de superficies en paneles de cerramientos de fachadas. La linealidad vendrá dada por el proceso de fabricación, que habitualmente será el laminado que da lugar a perfiles en forma de I, de U, L, etc. En general, la textura y el color no serán del propio acero, sino los de la pintura que se extiende sobre sus superficies. Sólo si se utilizan aceros inoxidables tendremos elementos lineales con texturas propias del acero, que, además del acabado pulido y brillante, tiene otras posibilidades de color oscuro y superficie rugosa y mate.



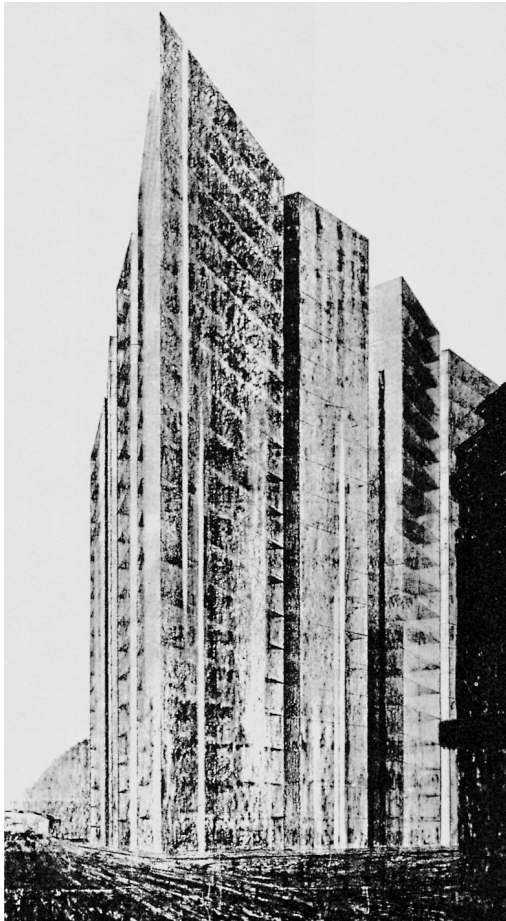
El perfil del edificio queda configurado por la linealidad de los elementos vistos de la estructura portante.



Fachada en la que el cerramiento realizado con paneles con cara exterior de acero mate se encaja entre los elementos de hormigón blanco visto de la estructura.

El vidrio

El vidrio es un material que ha experimentado en sus métodos de producción una evolución fulgurante en el siglo xx. La razón se encuentra, en parte, en que en la época clave de la arquitectura moderna, los años veinte, formó parte decisiva de las propuestas de renovación profunda de las formas arquitectónicas. La incorporación del acero a la estructura portante ya se había producido en muchos de los rascacielos de Chicago y Nueva York con fachadas resueltas mediante obra de fábrica. Pero la fachada completamente vidriada da un nuevo sentido al edificio en altura, ya que incorpora a su imagen su elemento más distintivo, el es-



Una de las imágenes que ejercieron gran influencia en las propuestas del movimiento moderno.

queleto de acero y una nueva idea de ligereza y transparencia. En su momento no era una idea totalmente eficaz, ya que los vidrios no podían proporcionar el aislamiento necesario a su nuevo papel de fachada total, pero esas imágenes provocaron una evolución de las técnicas de producción hasta llegar a los vidrios aislantes actuales.

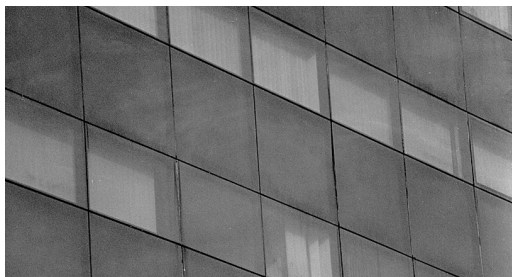
Obviamente, la característica diferenciadora del vidrio es su transparencia, y en consecuencia, su percepción plástica tendrá como variable previa fundamental los diversos grados y colores de esta transparencia, y dos percepciones diferentes según la posición del observador, desde el exterior o desde el interior del edificio.

En este segundo aspecto, además de la visión directa del vidrio, su transparencia y su color influyen en la calidad plástica de la iluminación.

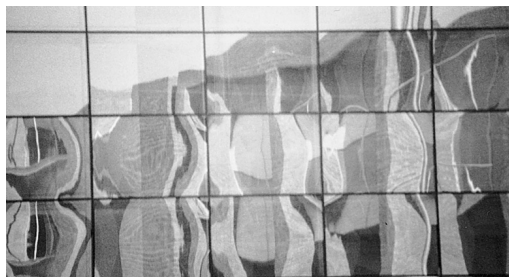
Si la transparencia es total, la plástica del vidrio se basa precisamente en su desaparición y la transferencia de la expresión plástica a los elementos que tiene detrás (obviamente, si está limpio). Si un observador está en el interior del edificio, será la plástica del paisaje la que dominará; si el observador está en el exterior será la plástica de los elementos internos, y si el edificio es alto, el techo de cada planta visto desde la calle, efecto que se acentúa si es de noche.



El aspecto nocturno de las fachadas de vidrio siempre es diferente del diurno, máxime cuando el vidrio es reflectante, característica que pierde por la noche. El diseño de los techos, o de los otros elementos interiores visibles, adquiere una gran importancia (visión nocturna del edificio de la página 30).



Muro cortina resuelto con silicona estructural con vidrios tintados en su masa con un color oscuro.



Si el vidrio no es suficientemente rígido, puede producir reflejos muy deformados.

Si el vidrio no es transparente, la variable que se pone en juego es el color de esta no-transparentencia. Las vidrieras de la arquitectura gótica son uno de los ejemplos más notables. Si nos limitamos a la arquitectura más actual, la no-transparentencia del vidrio es una característica que lo que busca es proteger el interior del edificio de la radiación solar, y esto se puede hacer mediante dos caminos: tiñendo en masa el color o bien mediante un proceso similar a lo que se hace en los espejos, depositando en una de las caras sales minerales que, además, le dan un nuevo carácter plástico, la reflexión (III-7.1.1). En el primer caso dominará el color de la masa del vidrio, que habitualmente es azulado o verdoso; en el segundo caso dominará el color de las sales minerales. Si éstas son incoloras, el factor dominante es la reflectancia y el color será el de los elementos reflejados que tenga delante, como pueden ser el cielo u otros edificios. En este caso, la planeidad, la rigidez y en consecuencia el tamaño y el espesor de los paneles de vidrio pasan a ser variables decisivas. Si son bajas, los reflejos pueden aparecer muy deformados.

Para evitarlo es conveniente dar mayor grueso al vidrio o reducir su dimensión. El dibujo general será consecuencia de esta dimensión de los paneles de vidrio, que se unirán entre sí, y a la estructura portante, mediante los parteluces y los travesaños de los muros cortina, que pueden quedar ocultos si se utilizan siliconas estructurales. Si la fachada está resuelta mediante anclajes concretos de los paneles, será necesario un material de sellado entre ellos, como la silicona, que será la línea que determinará el dibujo.

Sin duda, las técnicas de producción de vidrio y de paneles de acero u otros metales son las que han dado y pueden dar en un futuro próximo los resultados más espectaculares en la generación de nuevas imágenes arquitectónicas. Pero, que para que sean realmente arquitectónicas han de ser imágenes de elementos legitimados por la satisfacción de las razones prácticas, y no fruto de una ensimismada fascinación por la innovación en sí misma. Lo cual nos lleva ya al tema final de este tomo I.



Muro cortina tradicional con vidrios reflectantes.



Primer plano de los puntos de anclaje y del sellado de silicona de la fachada que aparece en la página 211.

TEMA 16. Razones prácticas (uso y duración) y conveniencia estética

RAZONES PRÁCTICAS Y VARIABLES DE LA PERCEPCIÓN ESTÉTICA

ESPACIOS BIEN RELACIONADOS

Desplazamientos

Vistas

ESPACIOS BIEN AMBIENTADOS

Modificación del ambiente natural

Expulsión del agua

Iluminación natural

Comodidad térmica

Rectificación del ambiente artificial

Comodidad acústica

DELIMITADORES ESPACIALES ESTABLES Y DURADEROS

Con técnicas tradicionales

Estabilidad a los embates externos

Integridad a largo plazo

Con técnicas contemporáneas

RAZONES PRÁCTICAS Y VARIABLES DE LA PERCEPCIÓN ESTÉTICA

El objetivo de este último tema es destacar, mediante unos pocos ejemplos, cómo las variables que determinan los efectos estéticos pueden estar en relación dialéctico-positiva o entrar en conflicto con las razones prácticas.

Tal como ya se ha expuesto en el tema anterior, la tesis defendida en este libro es que en la inmensa mayoría de los casos la primera es la postura correcta. Pero no se niega que en alguna ocasión, en la que domine una razón no objetivable, pueda ser la contraria. Pero lo que es del todo inadmisibles es que los conflictos se produzcan por desconocimiento de los que tienen capacidad de decisión en el diseño arquitectónico.

Un conflicto entre un objetivo estético y una razón práctica se da cuando la forma o el

material que satisface el primero impide dar satisfacción a la segunda, o al revés.

Como se ha visto a lo largo de todo el libro, cada una de las exigencias derivadas de las razones prácticas requieren ciertas formas y materiales, que denominamos “soluciones constructivas”. Pero no existe una relación biunívoca entre exigencias y soluciones constructivas, sino que cada exigencia concreta puede ser satisfecha por un amplio repertorio de soluciones. Muchas, pero no todas. Sin duda, existen soluciones incompatibles con determinadas exigencias, como, por ejemplo, las fachadas transparentes con la privacidad a las vistas desde el exterior.

La relación dialéctico-creativa se consigue cuando se llega a un pacto entre exigencias contradictorias (en este caso las prácticas y las estéticas), que da lugar a una solución cons-

tructiva que satisface en buena medida todas ellas. De hecho, no es más que lo que la arquitectura ha hecho prácticamente en la totalidad de su historia.

El tema presenta algunos casos de entre los subsistemas y requisitos o exigencias que mayor trascendencia tienen en la estética arquitectónica. Es un ejercicio que el lector puede extender al resto de los elementos y requisitos explicados en los temas anteriores que no aparecen en éste y en los que podemos encontrar interesantes ejemplos. Uno de ellos puede ser la relación de acuerdo con la defensa de la intromisión no deseada que genera formas muy válidas estéticamente, desde los castillos medievales hasta los vidrios blindados actuales pasando por las rejas de todo tipo en plantas bajas. Otros casos surgen de analizar la influencia de la contaminación o de otras exigencias no explicitadas ahora. En los capítulos correspondientes del tomo II se pueden ver además las relaciones con otros elementos no tratados en éste.

No se trata, obviamente, de un estudio exhaustivo, sino unos pocos ejemplos que sólo pretenden aclarar la idea de acuerdo positivo o de relación dialéctico-creativa. Pero no se ha de creer que se defiende a ultranza algo similar a la sinceridad constructiva. Las buenas soluciones arquitectónicas no necesitan exhibir sus episodios constructivos, aunque, obviamente, tampoco falsearlos a manera de escenografía teatral. Lo que sí se defiende, como ya ha quedado claro a lo largo del libro, es que nunca una razón expresiva ha de entrar en conflicto con una razón práctica, o al revés, y que una buena manera de conseguirlo, aunque no la única, es buscar soluciones en las que se dé la relación de diálogo creativo entre ellas.

Por razones pedagógicas, algunos casos elegidos se alejan de lo que podemos considerar usual con el fin de que estas relaciones queden muy evidenciadas. La referencia a las soluciones históricas, justificadas en la introducción al capítulo, tiene en este tema todavía mayor presencia que en el anterior. La idea de espacio, como objetivo básico de la arquitectura, ordena la exposición de los ejemplos que analizan sucesivamente sus relaciones de uso, su ambiente, y la permanencia en el tiempo de los elementos que lo delimitan.

ESPACIOS BIEN RELACIONADOS

Las relaciones de uso entre el espacio exterior y el interior, desplazamientos o vistas, influyen de manera decisiva en la configuración expresiva de las fachadas.

Desplazamientos

Las puertas que permiten el acceso al edificio desde el exterior siempre han tenido presencia destacada en las fachadas, justificada sólo en parte por la necesidad de advertir al usuario el lugar de ubicación del acceso al interior.



El acceso a una escuela de enseñanza primaria, elemento principal en la composición de su fachada.

Su papel es relevante como lugar privilegiado donde se deposita parte importante de las claves expresivas del edificio. Y, a pesar de que la arquitectura moderna no le da el carácter axial y centro simétrico habitual en épocas anteriores, en la actualidad son bien pocos los casos en los que se ha sustraído al acceso al edificio esa función simbólica. Dada la importancia de la cuestión, no se conocen casos en los que la expresión haya entrado en conflicto con la razón práctica de la accesibilidad.

Lo cual no puede decirse de otros elementos que la permiten, como las rampas.

Dado el corto período de tiempo transcurrido desde que son obligatorias las normas de accesibilidad que facilitan el desplazamiento de los usuarios con algún impedimento motor, el diseño de las rampas bien integradas en el basamento del edificio está en sus inicios, lo cual no impide exponer algún buen ejemplo, tanto privado como público. La mayor dificultad se presenta cuando se ha de dotar de ellas a un edificio existente.

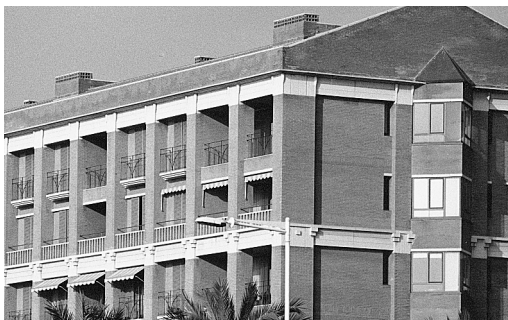


Rampas de los sucesivos accesos verticales de un bloque de viviendas de cierta longitud.



Rampa de conexión entre dos plazas públicas a diferente cota.

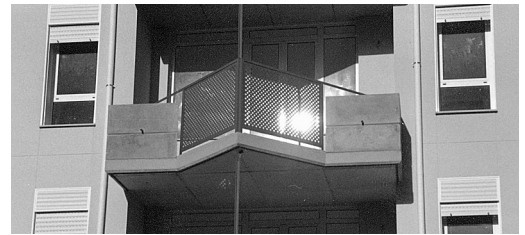
En el caso del uso de vivienda, también se han de considerar como elementos de relación entre el espacio exterior y el interior los que hemos denominado espacios semiexteriores, balcones, tribunas, etc., que además aportan una ambivalencia ambiental que los hace especialmente útiles en nuestros climas. Su ineludible presencia en las fachadas de edificios de vivienda, difícilmente objetable, no necesariamente ha de suponer una merma de un cierto carácter urbano semimonumental. La integración de las dos razones es perfectamente posible.



La potente composición de pilastras e impostas que domina la percepción urbana de este edificio permite integrar episodios domésticos sin necesidad de renunciar a ellos, tales como el balcón, la terraza o el mirador.

Vistas

Las conexiones visuales entre los espacios siempre han sido un razón bien poderosa en el diseño de las fachadas de los edificios en los que el usuario necesita de las vistas del entorno, como los de vivienda, los docentes, etc. En ellos es impensable la no existencia de ventanas a nivel de los ojos de ellos y, habitualmente, es una razón práctica perfectamente integrada en la expresión global que puede también extenderse a los antepechos de las terrazas o balcones.



Los antepechos de los balcones han de ser seguros contra la caída y no escalables por los niños. Si además queremos que sean transparentes, una buena solución, diferente a la de barrotes verticales, es la representada aquí.

No obstante, no cuesta excesivamente encontrar casos de lo contrario como, por ejemplo, cuando una estética basada rigidamente en las persianas de lamas fijas impide una conexión con el exterior que no sea a través de las rendijas que dejan las lamas.

Las lamas, por contra, son un buen recurso cuando se necesita superar la contradicción entre ventilación permanente y vistas desde el exterior, como ocurre con los tendederos de ropa en fachada, que, a pesar de las máquinas secadoras, siguen siendo convenientes, a no



Tendederos de planta semicircular.

ser que mermen las posibles vistas desde la cocina. Como siempre, una buena dosis de imaginación arquitectónica puede sacar partido de la resolución del problema.

Para otros usos, las vistas quedan más condicionadas por otras razones. En el uso religioso, los huecos al exterior son necesarios sólo para iluminar y quedan libres de la limitación de su altura, lo cual permite adoptar formas diferentes que identifiquen claramente el uso. Lo que también ocurre en los casos en que los huecos no son necesarios por ninguna de las dos razones, como es el caso de los grandes almacenes comerciales.



Una de las pocas excepciones al requerimiento de transparencia de las fachadas lo constituye los grandes almacenes, lo que permite adoptar formas expresivas insólitas.

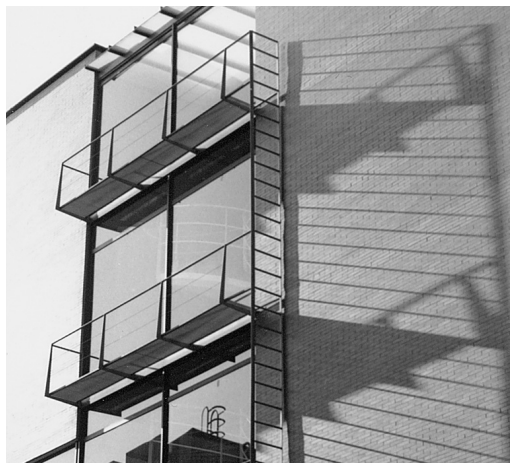
En el caso de los edificios administrativos habituales, el muro cortina se justifica porque permite alcanzar el máximo de iluminación natural y las vistas se dan por añadidura, y en ge-



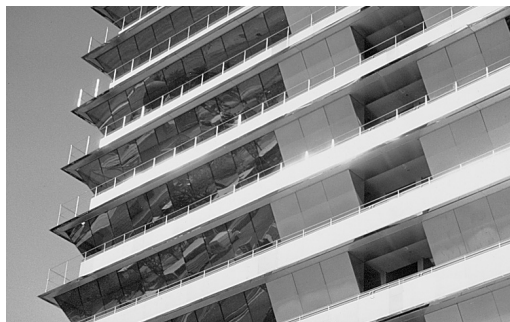
Edificio administrativo situado delante del mar. Las vistas se establecen a través de los patios abiertos en fachada con visuales en escorzo combinadas con reflejos en los vidrios enfrentados. La iluminación natural se refuerza con un patio interior.

neral, sin razonar sobre su necesidad o conveniencia. Pueden encontrarse otras alternativas que, sin renunciar a la iluminación natural, ofrezcan unas vistas más sugerentes y creen un espacio interior algo más cerrado en sí mismo.

En todos los casos, si se requiere la conexión visual, la contradicción con el aislamiento del aire exterior se resuelve con el vidrio, que a su vez requiere, para mantener esa conexión en condiciones, mantenerse limpio. Y precisamente la accesibilidad para su limpieza está generando desde hace pocos años nuevos motivos formales en las fachadas que constituyen buenos ejemplos de relaciones dialéctico-creativas.



Cerramiento acristalado del hueco de la escalera interior del edificio cuya imagen se enriquece por los artilugios dispuestos para acceder a su limpieza.



La particular forma de la fachada de este rascacielos se genera a partir de la resolución de la limpieza de sus vidrios que se efectúa desde la pasarela que rodea todas sus plantas.

ESPACIOS BIEN AMBIENTADOS

Modificación del ambiente natural

La modificación de las condiciones climáticas es otra de las razones prácticas que influye de manera decisiva en la generación de formas arquitectónicas y con la que la conveniencia estética, de manera más o menos afortunada, ha entrado desde el origen de la arquitectura en relación dialéctico-creativa.

Expulsión del agua

De los tres factores climáticos básicos, en este apartado veremos la iluminación natural y las variables térmicas, dejando la protección frente al agua para el apartado de la integridad a largo plazo, junto con los factores climáticos que también afectan a la duración del edificio.

Iluminación natural

Conseguir que el interior del edificio quede iluminado por la luz natural ha sido una constante potentísima a lo largo de la historia de la arquitectura. Ejemplos relevantes, ya citados por otra razón, son las catedrales góticas. La comparación de las que surgieron en la Europa septentrional con las mediterráneas nos suministra otro caso de acuerdo positivo.

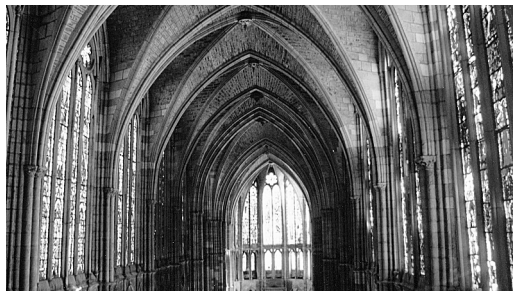
Las del norte llevaron al máximo posible el tamaño de los ventanales, mientras que las del sur los mantuvieron en unas dimensiones pro-



Las vidrieras dejan una gran proporción de paramento ciego entre las nervaduras.

porcionales a la mayor luminosidad de su cielo, pero sin renunciar ninguna a lo específico del estilo. La influencia positiva de la adaptación al clima en la expresión arquitectónica se completó con la adopción los dos tipos básicos de cubiertas, inclinadas en la Europa lluviosa y planas en la seca (ver página 215).

Si pasamos a la arquitectura civil, la iluminación natural también tiene una participación activa en la estética de las fachadas a través de las ventanas, condicionadas además por la necesidad de conexión visual con el espacio exterior innecesaria en las iglesias. Resuelta la contradicción ya citada entre vistas, luz y frío por medio del vidrio, las ventanas pueden ser de mayor tamaño con la única limitación de la resolución mecánica de su dintel o arco, que se siguen apoyando en gruesos muros, y la del pequeño tamaño de los vidrios, limitaciones que caracterizan las fachadas y las carpinterías de las épocas anteriores al siglo xx.



Las vidrieras ocupan toda el espacio situado entre los pilares que reciben los nervios de las bóvedas. Sus empujes se transmiten a los arbotantes vistos en la página 44.



La carpintería de las puertas balconeras se adapta a las dimensiones posibles de los vidrios.

En los inicios de este siglo, con la superación de ambas, la arquitectura incorpora en su estética la transparencia de sus fachadas, justificada en parte por una supuesta necesidad insatisfecha de luz natural, pero todavía con graves carencias térmicas. La aparición en el último tercio del siglo xx de vidrios de gran tamaño con ciertas capacidades aislantes térmicas parece superar definitivamente esas carencias. Aunque, paradójicamente, para algunos sigue siendo más atractiva la imagen de un pasado algo periclitado.



Esta imagen, tomada de un edificio actual, es el único caso de falseamiento (recuérdese los párrafos iniciales del presente tema) que se expone en estas páginas. La aparente reducida dimensión de los vidrios (adoptada en esta ventana como evocadora de un estilo propio de un pasado en el que los vidrios no podían ser mayores) se consigue con la colocación, en la cámara de un vidrio doble aislante, de unos listones que, sólo en apariencia, subdividen la mucho mayor dimensión real del vidrio. Si bien no se puede decir que sea una opción conflictiva con la razón práctica, su falsedad es manifiesta.

La producción de vidrios de altas prestaciones parece hacer posible definitivamente el mito de la arquitectura inmaterial. Pero, como ya va quedando claro en realizaciones bien recientes, la caja de vidrio con un espacio interior carente de protección contra las vistas, contra el exceso de luz y, a pesar de todos los avances, contra el exceso de calor o consumo energético, no parece una propuesta a seguir sin una justificación muy potente.

Pero tampoco la contraria. Paradójicamente, determinadas opciones compositivas contemporáneas, pueden desde impedir la incorporación de los volúmenes de los lucernarios

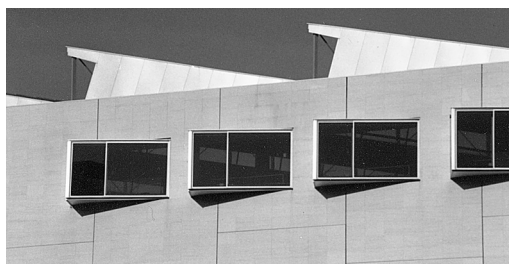
hasta mermar drásticamente la entrada de luz por las fachadas, dando como resultado espacios interiores con permanente necesidad de luz artificial. No parece tampoco un camino a seguir.

La arquitectura más comprometida con la resolución de los problemas prácticos aprovecha al máximo la luz, aunque tamizándola según su uso, y hace participar activamente en la expresión arquitectónica los procedimientos de que se sirve para ello, ventanas, persianas, partesoles o lucernarios bien orientados, como se puede observar en las obras de uno de los maestros de la arquitectura contemporánea, Alvar Aalto.



La luz natural es un bien preciado en las latitudes de la Europa más septentrional donde se encuentra la mayor parte de la obra de Aalto.

Pero quede claro que no se propone aquí imitar formas de una indudable calidad, pero hechas para otras latitudes, algunas cercanas al círculo polar ártico, donde la captación de luz, venga de donde venga, pasa a ser un objetivo prioritario por encima de cualquier otro. Lo que se propone es conocer e imitar lo esencial de actitudes y obras en las que se da un pacto creativo entre conveniencia estética y razones prácticas.



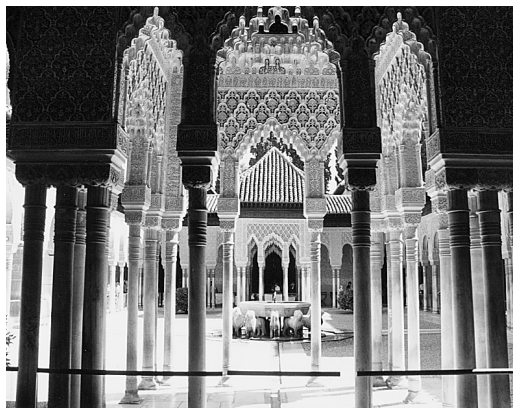
Los lucernarios orientados al norte definen el perfil del edificio.

Comodidad térmica

Distinguiremos el verano del invierno. Sus influencias son ciertamente diferentes.

La comodidad térmica en verano sin consumo energético ofrece una historia rica en respuestas arquitectónicas.

Una visión de casos históricos no puede dejar de citar, a pesar de su lejanía en el tiempo, los logros de la mejor arquitectura nazarí, que involucró todos sus recursos para crear unos espacios en los que los efectos refrigerantes naturales eran los motores de una expresión arquitectónica de extraordinaria sensibilidad poética.



Sabía combinación de patios, espacios semioteriores y efectos refrigerantes, reales y psicológicos, del agua en movimiento.

Si nos limitamos a la envolvente, muchos de sus elementos con relevancia formal o plástica han derivado directamente de reducir al mínimo la aportación calorífica de los rayos solares. A lo largo de la historia se han dado infinidad de soluciones doblemente convenientes tales como las persianas de cuerda o las cubiertas ventiladas y con potentes aleros de la arquitectura popular, o los *brise-soleil* de la arquitectura actual, derivados de las propuestas que en este sentido hicieron los vanguardistas de la década de 1920, o las nuevas generaciones de vidrios filtrantes de la radiación.

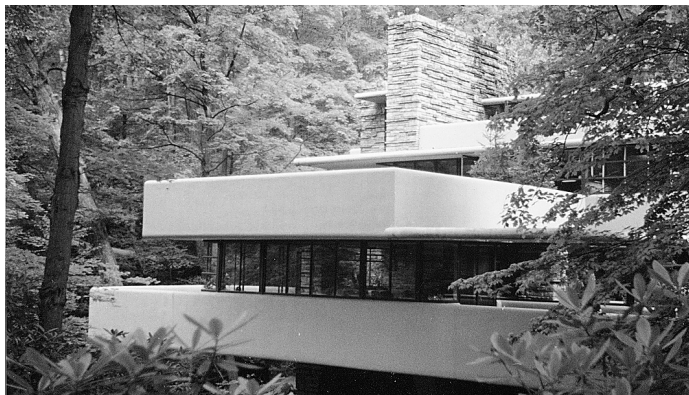
Es preciso insistir en que determinadas propuestas estéticas actuales, que buscan materializar el mito del edificio transparente, entran en claro conflicto con la comodidad térmica



Fachada orientada al sur que combina el efecto protector de los vidrios reflectantes con un parasol (*brise-soleil*) cuya eficacia máxima se aprovecha cuando es más necesaria, en verano.

ca en verano, con la moderación energética invernal y con la iluminación natural en un clima como el nuestro.

Históricamente, la satisfacción de la comodidad térmica en invierno, después de la temprana generalización (más o menos en el siglo xv) del uso del vidrio para superar la contradicción entre vistas, luz y frío, no ha influido en la creatividad arquitectónica de una manera autónoma e independiente de las otras razones prácticas o de la lógica de la producción. En el pasado, normalmente, la comodidad se alcanzaba aumentando la ropa de abrigo y confinando en lugares muy concretos la fuente energética que podía incrementarla, el fuego. El papel del edificio y sus elementos se reducía a crear un espacio sin lluvia ni viento, que no era poco, pero tan frío como el exterior, salvo la zona cercana al fuego. La estabilidad, la expulsión del agua y la estanquidad al aire, conseguidas con muros pesados de obra de fábrica y las ventanas más o menos estancas, eran las razones que realmente tenían peso en su configuración global y estética. La influencia de la necesidad de atemperar los espacios se concretó en los artilugios mediante los cuales se sacaba el máximo rendimiento a los efectos beneficiosos del fuego y se evitaban los negativos, como los hogares, las chimeneas, las salidas de humos, que configuraron los interiores y los perfiles de los edificios durante siglos, dotados todos ellos de una componente fuertemente simbólica.



Una sola vista exterior (con la chimenea) no hace honor a la extraordinaria riqueza arquitectónica de esta casa que el lector deberá admirar (especialmente la vista con la cascada) en los libros dedicados a este gran maestro de la arquitectura moderna. Se ha de añadir que, en relación con la integridad frente al paso del tiempo, no es un ejemplo a seguir. Su restauración ha sido costosísima.

Un buen ejemplo de acuerdo positivo, ya en pleno siglo xx, se encuentra en uno de los edificios emblemáticos de la primera arquitectura moderna, La Casa de la Cascada, de Frank Lloyd Wright (decidido defensor del fuego como centro simbólico de la casa) de la que se ha dicho (entre otras muchas cosas) que es una chimenea sobre una roca.

La aparición a finales del siglo xix (y notable desarrollo posterior) de las instalaciones de calefacción y el relativo bajo coste de los combustibles propiciaron la extensión de estas instalaciones a todos los edificios y a todos sus locales, pero sin variar, en general, la configuración tradicional de la envolvente. Los cambios que se produjeron en las fachadas se derivaron de las mayores posibilidades dimensionales del vidrio que llevó al aumento de las superficies acristaladas. Lo que sí se transformó sustancialmente fue el comportamiento de los usuarios que pasaron de basar la comodidad térmica en el abrigo a hacerlo en el consumo energético. Sólo la crisis de la década de 1970 trastoca el panorama, pero con escasas repercusiones arquitectónicas.

Cuando los precios del petróleo se disparan, se ponen en marcha múltiples estrategias tendentes a evitar el consumo, pero sin renunciar a lo niveles de comodidad alcanzados. La de mayor difusión ha sido el incremento de los aislamientos térmicos de ventanas y muros (con las posibles consecuencias negativas con relación a su duración ya vistas en los temas 4 y 11 sin variar su configuración exterior lo más mínimo, aunque sí sus costes.

Pero, aunque limitada a pocos casos, otra línea de argumentación lleva a una influencia neta y directa de la comodidad invernal en la estética arquitectónica, con formas radicalmente diferentes, basadas en el máximo aprovechamiento del efecto invernadero y el elevado aislamiento conseguido enterrando los espacios del edificio.



Acceso a una vivienda semienterrada por tres razones: adaptación al terreno, protección del ruido de una carretera próxima y ahorro energético tanto en verano como en invierno.

La evolución posterior de la economía mundial ha suavizado el coste energético, pero como ya se ha indicado en diversas ocasiones líneas atrás, el frágil equilibrio ecológico obliga en la actualidad a mantener como objetivo de los profesionales de la arquitectura que sus edificios consuman el mínimo. Obviamente, no es necesario recurrir a formas tan extremas, pero ya empieza a ser incuestionable que nuestras propuestas estéticas no han de comportar soluciones incompatibles con la moderación energética.

Rectificación del ambiente artificial

Comodidad acústica

Tal como ya se ha indicado en I-7, la aparición de un ambiente artificial exterior agresivo debido al ruido es un hecho muy reciente en la escala del tiempo de la historia de la arquitectura. La proliferación de vehículos motorizados en nuestras calles, que llegan a producir niveles de ruido superiores a 70 dBA, realmente molestos e incluso malsanos, sólo se da a partir de los años de 1950-1960.

La respuesta de la arquitectura para la vivienda ante esta situación no ha sido muy creativa. Se han producido pocas propuestas que integren de una manera imaginativa los requerimientos de la protección acústica del exterior.

Los ejemplos más comunes son edificios que frente a una autopista urbana ofrecen fachadas bastante ciegas donde se sitúan locales de servicio o dormitorios, quedando las salas de estar en la cara opuesta, supuestamente protegida por el propio edificio, que actúa como una pantalla acústica. Son propuestas con cierto valor arquitectónico pero que no resuelven, en nuestros climas, la totalidad del problema, ya que la comodidad térmica en verano exige abrir la ventana que da a la autopista con tal de conseguir una ventilación cruzada. Una vez más se ha de insistir en que el problema no puede analizarse por separado de la comodidad térmica estival.

Como propuesta, se vuelve aquí a recoger (ya citada en I-7) la de que las fachadas afectadas de un nivel de ruido elevado y constante, como casi todas las situadas en un medio urbano (es decir, la gran mayoría de las fachadas), han de ser dobles en toda su extensión, organizando entre sus dos capas espacios también recubiertos con materiales absorbentes y con diversas alternativas a la circulación de aire adecuadas a las diferentes épocas del año. Las restrictivas normativas municipales actuales con relación a espacios semiexteriores son una seria dificultad casi imposible de superar. Si no fuera por ellas, la resolución del problema supondría una nueva fuente de creatividad arquitectónica en las fachadas y de comodidad para sus usuarios.



Si la arquitectura (y las autoridades municipales) se hubiera tomado en serio la resolución del aislamiento del ruido exterior en los medios urbanos (sin renunciar a la aireación natural refrigerante), habría tenido que llegar a fachadas similares (en sus aspectos esenciales) a la de la imagen, u otras difíciles de imaginar ahora que se hubieran ido elaborando con el tiempo. La de la imagen se construyó por otras razones cuando todavía no había tráfico rodado, ruidoso, pero constituye un ejemplo claro de un tipo de fachada que podría resolver la cuestión, imposible de encontrar en una realización reciente.

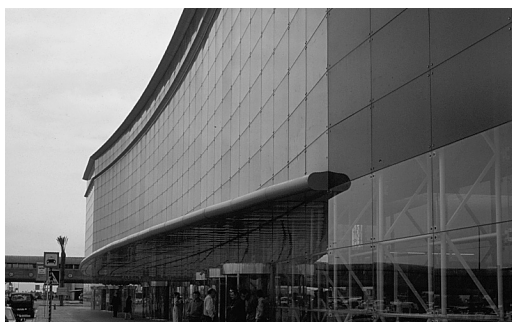
Obviamente, los espacios semiexteriores no cerrados situados en un entorno urbano altamente ruidoso son inutilizables. Si no lo es demasiado se pueden reducir sus efectos revistiendo el techo con placas absorbentes.



La calidad ambiental de esta terraza semiabierta se mejora con el material absorbente del techo.

Sin duda, como ya se ha indicado en I-7, la participación creativa de la arquitectura en la protección de la agresividad acústica del medio urbano es una de las últimas asignaturas pendientes de su portentoso proceso de adaptación a las nuevas circunstancias del siglo xx.

Si dejamos lo doméstico y nos vamos a lo público, es posible encontrar algún caso de acuerdo positivo, como el procedimiento de la doble hoja con paneles de vidrio que puede ser útil para resolver la contradicción entre aislamiento acústico y conexión visual, contradicción que llega a ser máxima en un aeropuerto. En el caso que aparece en la figura, este procedimiento ha sido la clave que ha generado toda la expresividad plástica de la fachada. Las diferentes gradaciones de la opacidad del vidrio resuelven los inconvenientes de un exceso de iluminación o radiación solar.



Con sólo dos niveles de opacidad del vidrio tintado en masa se consigue desde la transparencia total al nivel de la vista del usuario hasta la suficiente protección de los rayos del sol en la parte más elevada.



Idea básica generadora de la fachada. Dos láminas de vidrio separadas por una cámara de aire, que proporcionan un aislamiento de unos 50 dBA, unidas a una estructura portante específica de la fachada formada por una viga triangulada vertical (ver también p. 201).

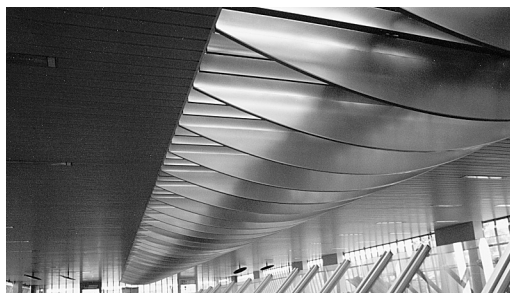
Si del exterior nos trasladamos al espacio interior, nos encontramos con otro conflicto bastante habitual en nuestra cultura, de difícil solución sin una cierta colaboración de la estética arquitectónica. Una gran mayoría, o casi la totalidad de nuestros edificios públicos de cierta calidad arquitectónica tienen sus espacios interiores delimitados por superficies lisas y duras. Ejemplos se pueden encontrar de todo tipo, desde escuelas, incluso de arquitectura, hasta estaciones ferroviarias emblemas de la modernidad más avanzada.

La razón no es la necesaria resistencia al uso ya que se trata de superficies en su mayoría inaccesibles. La razón de la elección es de orden estético. Pero claramente inconveniente. Los alumnos han de hacer un notable esfuerzo suplementario para entender a sus profesores o los viajeros se estremecen cuando el maquinista anuncia la marcha de su convoy.

La causa reside en que en nuestro país no está bien vista por ciertos profesionales de la arquitectura la imagen abigarrada o "tecnológica" de los revestimientos o placas absorbentes y que, por supuesto, no tenemos una cultura del silencio como algunos europeos del centro.

La solución, si se considera que es un problema, puede pasar por estas dos vías:

- la aceptación creativa de las texturadas superficies de los absorbentes usuales o la de las placas prefabricadas, solución barata de aplicación inmediata, o,
- la extensión de la creatividad al diseño de sofisticados dispositivos que conjuguen absorción, lisura y alguna que otra razón práctica.



Las lamas del lucernario de esta estación de ferrocarril de una población alemana, situadas justo encima del trazado de las vías, son dispositivos absorbentes por resonancia. El paso de los trenes es realmente silencioso.

DELIMITADORES ESPACIALES ESTABLES Y DURADEROS

El imperativo de crear espacios mediante elementos estables y duraderos ha sido una de las razones que mayor capacidad expresiva ha dado a la arquitectura, ya que afecta a su propia existencia. Sin duda, la capacidad de respuesta ante el primer embate gravitatorio y los embates horizontales posteriores y la permanencia sin las degradaciones producidas por el paso del tiempo, han sido dos razones clave que han influido decisivamente en un pasado histórico dilatado y en la actualidad, pero que tienen respuestas muy diferentes y algo paradójicas según consideremos la arquitectura anterior o posterior a la segunda mitad del siglo XIX.

La anterior está condicionada por disponer sólo de la obra de fábrica para crear espacios, aunque eso no impide que puedan ser de la máxima calidad arquitectónica. La posterior, con la incorporación del acero primero y el hormigón armado o pretensado después, rompe cualquier límite de luz y alturas posibles. Sin embargo, incorpora por variados motivos, entre ellos la poca durabilidad del acero, una mucho menor resistencia al paso del tiempo, resistencia que había sido, por contra, una de las mayores virtudes de la arquitectura de los siglos anteriores.

La estabilidad sin límites es una de las matrículas de honor de la arquitectura actual. La durabilidad, una de sus peores notas. Veamos algunos ejemplos.

Con técnicas tradicionales

Estabilidad a los embates externos

Prácticamente toda la arquitectura anterior al siglo XX basa su expresión en las necesidades y posibilidades de los muros y bóvedas de piedra o ladrillo que trabajan sólo a compresión, configurados además por ser delimitadores de espacio con aberturas resueltas según la forma recta del dintel o la curva del arco.

La combinación de todos estos factores más la expulsión de aguas, tal como se comenta en el siguiente apartado, ha sido la base sobre la cual se ha organizado la expresión de la

mayor parte de la arquitectura histórica en su apariencia exterior. Cualquier edificio clásico es un buen ejemplo.

Si nos adentramos en el espacio interior, podemos dividir la arquitectura anterior al siglo XX en aquella que cubre el espacio mediante elementos planos basados en las vigas y aquella que lo hace mediante bóvedas. Con relación a ello, recuérdese que, como se ha comentado en I-9, fue el fuego lo que incentivó el paso de las formas rectas de barras de madera a las bóvedas de piedra incombustibles en el caso de los espacios eclesiásticos de mayor tamaño, lo que constituye un buen ejemplo de acuerdo creativo. La historia de las bóvedas y sus diferentes esquemas de comportamiento estático está indisolublemente ligada a la arquitectura pública, religiosa o civil, dando lugar, en combinación con las posibilidades mecánicas del arco y al contrarresto de empujes con arbotantes, a un momento cumbre en la arquitectura gótica.

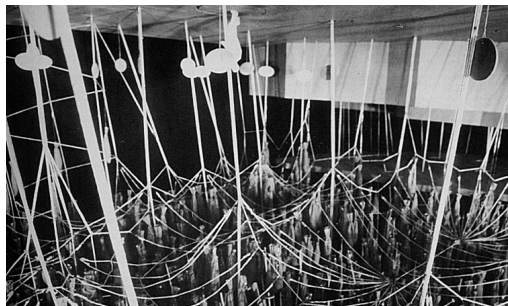


La catedral de Beauvais es considerada como uno de los hitos de la arquitectura gótica en sus aspectos dimensionales. La altura de la nave hasta la clave de sus bóvedas es de 48 m (15 pisos).

Pero, en realidad, lo que diferencia a los constructores góticos de los anteriores o posteriores es que los espacios arquitectónicos que deseaban crear, con sus desmesuradas alturas y la ligereza de sus masas, exigían al máximo las posibilidades de estabilidad de muros, pilares, bóvedas, arcos y contrafuertes. Ese deseo les obligó a la elaboración de unas formas estables en las que se dio la máxima conjunción con las capacidades mecánicas de los materiales que tenían a mano. Pero lo hicieron sin conocer como ahora nosotros los porqués ni sus límites, sólo por medio de una extraordinaria intuición constructiva.

Como caso cumbre final a principios del siglo xx, de esta relación de diálogo creativo entre arcos, bóvedas, obra de fábrica, resistencia sólo a compresión y expresión arquitectónica, es inexcusable citar dos obras de Antoni Gaudí, el templo de la Sagrada Familia y, especialmente, la iglesia de la Colonia Güell. Son dos obras que se diferencian de las góticas, entre otras cosas, por ser unas propuestas creativas basadas en el conocimiento profundo de las claves de la materialización de formas estables.

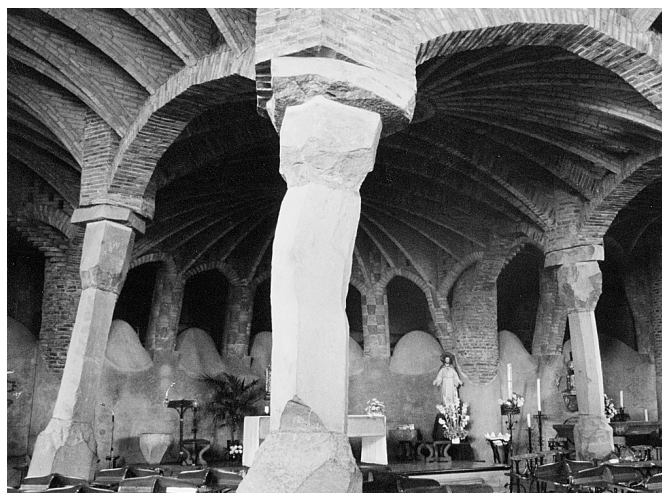
En parte de la primera y la totalidad de la segunda, todas las formas son consecuencia del principio de la estática que asegura que una forma funicular (hecha con hilos) estable en tensión, girada 180° pasa a ser una forma (arco parabólico o de catenaria con obra de fábrica) estable en sí misma sólo por compresión y sin



Fotografía de la maqueta funicular (reproducida hace pocos años por un equipo dirigido por el holandés Jos Tomlow) que recoge el tramo central de la Cripta. Si se invierte 180° se comprueba su concordancia con la realidad construida.

necesidad de ayudas externas como contrafuertes o arbotantes. En el caso de la Cripta, la generación de una forma global de enorme complejidad mediante una maqueta de hilos permitió a Gaudí crear una obra arquitectónica extraordinaria conociendo su esencia estable previamente.

Obviamente, es una obra propia de un arquitecto y una época muy especiales que no tenemos porqué reproducir en sus formas concretas, pero sí tener en cuenta en sus aspectos más esenciales: sus formas no son consecuencia de un formalismo expresivo ensimismado e ignorante, sino del conocimiento profundo y responsable de su creador. Es una lección de acuerdo positivo a no olvidar.



Zona central de la Cripta, única parte construida de la proyectada iglesia.

Integridad a largo plazo

En el periodo histórico anterior a la incorporación del acero a la arquitectura, las degradaciones de los edificios provenían, o de la debilidad de la madera mal cuidada (la madera puede durar siglos si se cuida), o de la acción del clima sobre los elementos en contacto con el exterior, incluida el agua subterránea y los cimientos, respectivamente.

En la actualidad la debilidad de la madera se ha sustituido por la del acero, y los agentes derivados del clima, como consecuencia de la contaminación atmosférica, son todavía más agresivos. Y los edificios, debido a otra de las grandes novedades de la modernidad, la separación entre estructura y cerramiento, tienen una respuesta muy diferente a la de los edificios históricos de muros, y menos adecuada para resistir la intemperie. Como ya se ha comentado en I-11, el conocimiento del clima en el que estará situado el edificio no es solamente indispensable para el profesional de la arquitectura desde el punto de vista del ambiente, sino también desde el punto de vista de la permanencia en el tiempo del propio edificio.

Dos factores básicos comprometen la duración de la envolvente: la acción del agua y los movimientos térmicos consecuencia de los cambios de temperatura producidos por el asoleamiento directo del sol. Cada uno por separado y la combinación de ambos agentes, son realmente destructivos ya que los movi-

mientos producen fisuras que si dejan entrar el agua en el interior, además de afectar al ambiente también provocan la degradación del edificio.

Ahora bien, tal como también se ha dicho en I-11, la experiencia sobre el comportamiento de las soluciones constructivas a largo plazo siempre requiere un paso del tiempo significativo para comprobar su efectividad, con lo que la relación dialéctico-creativa en este sentido siempre es muy lenta.

La arquitectura clásica, por ejemplo, en su larguísimo período de formación pudo seleccionar con conocimiento de causa las formas y los materiales que aseguraban una durabilidad, irrenunciable para ella. La arquitectura actual no dispone de tanto tiempo.

Veamos la respuesta de la cubiertas y de las fachadas por separado.

El caso de la cubierta y las formas arquitectónicas derivadas de la expulsión del agua de lluvia es uno de los casos que expresa con más claridad la relación dialéctica entre las razones prácticas derivadas del clima y la conveniencia estética.

Las cubiertas de las épocas en que no existía ninguna otra posibilidad de solución que no fuera la de los pequeños elementos porosos, solapados como las tejas, o a testa como las rasillas, con más o menos pendiente según el clima, han determinado una enorme cantidad de soluciones estéticas convenientes. Un caso



Uno de los acuerdos positivos más fecundos de la historia.

extraordinariamente singular es la cubierta del templo griego que ha generado una de las formas arquitectónicas más indelebles, el frontón, resultado de la intersección de esa cubierta con la fachada. Es una forma que deviene autónoma y pasa a formar parte de la expresión arquitectónica aún sin tener relación con la expulsión de aguas.

La comparación de las cubiertas de las catedrales góticas de la Europa lluviosa con las de la seca proporciona un claro ejemplo de adaptación de la conveniencia estética a los mecanismos básicos de la expulsión del agua.



La cubierta a dos aguas de empinadas pendientes es una característica del gótico de la Europa del norte.



La menor pluviosidad de la Europa del sur permite adoptar otras soluciones de evacuación de aguas menos costosas y que confieren una identidad singular al gótico meridional.

En las fachadas, la relación de diálogo será diferente según el lenguaje general del edificio. En el caso de la arquitectura clásica, no se puede afirmar que la única razón causal de los elementos de su lenguaje sea la función de protección al agua, pero sí existe un acuerdo favorable con la durabilidad muy valorada en la Antigüedad. Los elementos como frontones, impostas, pilastras y cornisas no sólo alejan el agua de los paramentos de la fachada y de los puntos más débiles como son los huecos o las ventanas, sino que añaden la protección de la imagen inicial del edificio.



Los texturados muros de fachada de la arquitectura clásica (o neoclásica) asumen simultáneamente el papel estructural y de cerramiento con una buena resistencia al paso del tiempo. Los huecos son de formato vertical y reducida anchura y están siempre situados unos sobre otros. Los frontones, cornisas e impostas alejan la lluvia de los lienzos de las fachadas. Las leyes del descenso de cargas y de la duración configuran creativamente la expresión general de todo el edificio.

Un ejemplo claramente contrario es la falta de duración física que tuvieron las propuestas más novedosas de la arquitectura cubista de las décadas de 1920 y 1930. Su falta de respuesta frente al agua y a los movimientos diferenciales entre estructura y cerramientos generaron una arquitectura realmente efímera, pero que no se pudo comprobar hasta cierto tiempo después (recuérdese el edificio de la página 194).

Pero como ya se ha dicho, donde sí triunfa la arquitectura moderna es en la resolución de la estabilidad.

Con técnicas contemporáneas

A mediados del siglo XIX, la irrupción del acero ocasionó un cambio radical en la historia de la Ingeniería más cercana a la arquitectura. Los límites de la altura y la luz se ampliaron vertiginosamente, la torre Eiffel, el puente del estuario del Forth, etc. Sin embargo, su influencia en las obras arquitectónicas, sometidas a requerimientos mucho más diversos y complejos que las ingenieriles, fue mucho más lenta y reflexiva. El acero por sí mismo era incapaz de crear espacios bien ambientados. El concurso de la obra de fábrica era insustituible y la combinación de los dos tipos de materiales planteaba problemas ausentes en las obras de ingeniería, prácticamente resueltas con un solo material. Los primeros rascacielos y los que les siguieron hasta bien entrado el siglo XX tenían la envolvente de obra de fábrica que protegía la estructura metálica que quedaba oculta. Salvo en estos edificios singulares, la construcción seguía siendo la tradicional.

Este panorama se trastocó con la irrupción del hormigón armado, el vidrio y todas las propuestas de modernidad de los años veinte de ese siglo, que dieron al acero el papel protagonista que sólo había tenido en la ingeniería.

En el tema anterior ya se ha hecho referencia, como ejemplos más significativos de esos cambios, a los rascacielos de Mies van der Rohe y cuatro de los cinco puntos de Le Corbusier. La transparencia de las fachadas de vidrio que permiten ver la estructura de acero, la flexibilidad de las plantas, la horizontalidad de las ventanas, etc., son una clara expresión de que disponemos de nuevos materiales y nuevas formas estables para crear espacios.

Pero como ya se ha citado anteriormente, todas estas nuevas formas están basadas en dos cambios clave con consecuencias decisivas en la durabilidad: la utilización de un material difícil, el acero, y la separación entre estructura y envolvente. La irrefrenable tendencia del acero a oxidarse, tanto en perfiles como en redondos dentro del hormigón, y las deformaciones o los movimientos diferenciales entre estructura y envolvente, son causas potenciales de degradación. Por si fuera poco el acero estructural está claramente limitado por su debilidad frente al fuego.

La arquitectura actual sigue siendo heredera de aquellas propuestas que han ido evolucionando con la aceptación de los límites de la exhibición de los nuevos materiales, pero sigue planteando problemas de durabilidad no bien resueltos. Por una causa u otra, nos encontramos con que la arquitectura contemporánea es menos duradera que la del pasado, dicho siempre en términos generales ya que excepciones hay en los dos bandos.

Sin embargo, es preciso no olvidar el planteamiento realizado en I-11. Es posible que la conjunción de factores allí citados nos obligue a dar prioridad a reciclaje frente a la duración. Si así fuera, la falta de durabilidad no sería un defecto.

Pero si entre nuestros objetivos sigue encontrándose el de que nuestras obras mantengan su aspecto inicial y su capacidad de ser usadas durante un buen número de décadas, la única actitud razonable es la adopción de soluciones contrastadas, conjuntamente con nuevos criterios sobre mantenimiento, reparabilidad y la accesibilidad a todos los elementos susceptibles de degradación.

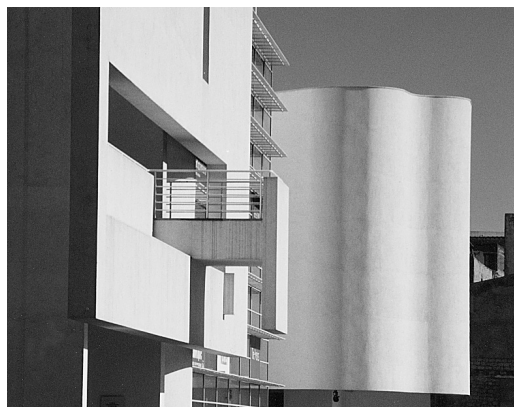
Si se desea mostrar la estructura portante, cuando sea de acero, sólo podrá hacerse en elementos no afectados por el riesgo de incendios. Si el acero es normal, deberá ser accesible para su mantenimiento periódico y sólo si es inoxidable, de coste inicial notablemente más elevado, podemos reducir las atenciones posteriores. Cabe otra posibilidad, la de forrar la protección contra incendios del acero por-



La estructura de soporte de la cubierta configura el perfil del edificio y queda en unas buenas condiciones de accesibilidad.

tante con acero inoxidable como hace una buena parte de la arquitectura *high tech* o de alta tecnología. Pero los costes se disparan todavía más.

Si es de hormigón armado, en general menos costoso, el acero de la armadura deberá estar protegido con gruesos recubrimientos de un hormigón compacto y resistente, o, mejor, todo el conjunto con revestimientos protectores, como siliconas, pinturas, revocos, etc., que pueden comportar la sustitución de la plástica del moldeo por la del tendido.



Las formas típicas del hormigón armado quedan revestidas por los revocos protectores.

Si el ámbito de trabajo es el de la arquitectura media sobre la que discurre este libro, la solución más económica pasa por proteger la estructura con la envolvente.



La fachada protege a la estructura y la cubierte a la fachada.

Si las fachadas son de obra de fábrica corriente, una buena solución sigue siendo, y lo será por mucho tiempo, la que conjuga la conveniencia estética con el efecto protector de una cubierta con buenos aleros. Es una solución tan enraizada en la historia como la propia obra de fábrica pero de la que también es posible encontrar buenos ejemplos de los maestros de la primera arquitectura moderna, especialmente de Frank Lloyd Wright. Que una solución tenga su origen lejos del siglo xx no es razón para proscribirla si sigue siendo útil.

No es éste el caso de las estructuras portantes de muros de obra de fábrica cuya validez, vigente durante siglos, parece ya periclitada, dada su carencia de flexibilidad de uso y sus dificultades de puesta en obra, con la posible excepción de los edificios de pequeño tamaño.

Frente a los nuevos materiales de fachadas que nos proporcionan las técnicas de producción más recientes, es recomendable adoptar una actitud cautelosa. Son numerosos ya los fracasos debidos a la utilización de materiales sobre los que no existe una comprobación fehaciente de la resistencia a largo plazo de sus características, incluidas las visuales como el color. Sin duda, la resistencia al paso del tiempo es una variable de difícil conocimiento sin que realmente el tiempo pase.

En definitiva, queramos que no, la exposición a una intemperie todavía más agresiva que la del pasado y el requerimiento inexcusable de mantener lo mejor posible sus características iniciales son factores que diferencian claramente los objetos arquitectónicos de los producidos por el resto de las artes. La necesaria integración de incontables innovaciones con comportamiento a largo plazo desconocido es una nueva diferencia entre nuestra arquitectura y la histórica.

Pero el estudio de las claves que permiten desvelar, en lo posible, esos desconocidos comportamientos requiere un tratamiento extenso que sobrepasa el de este apartado de consideraciones generales. Su análisis se expone en los tomos II y III de esta obra, tomos a los que invitamos que acuda el lector porque éste que tiene en sus manos finaliza aquí en sus contenidos conceptuales.

Bibliografía

Esta bibliografía tiene dos objetivos: el primero, orientar al lector que desee ampliar los conocimientos que haya adquirido en este tomo I, distinguiendo entre obras generales y monográficas sobre algún tema concreto. El segundo objetivo es dejar constancia de los textos, sobre construcción u otras cuestiones teóricas, que han servido de base para la concepción y redacción de estos tres tomos. De ellos, en la bibliografía básica se reseñan en primer lugar, y por orden de publicación, los cuatro textos sobre construcción más influyentes, como reconocimiento personal a sus autores. Se citan a continuación textos que se pueden encontrar en castellano con facilidad y que son útiles para esa primera ampliación. En la bibliografía ampliada se relacionan otras obras recientes, algunas de carácter no básico y otras básicas pero no traducidas. En el tercer apartado, se citan los textos que han contribuido a la elaboración de las bases conceptuales generales del conjunto de los tres tomos de esta obra.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

Obras generales

Textos de referencia

Benavent de Barberà, Pere, *Cómo debo construir* [1939], Bosch, Barcelona, 1993⁹.

Su autor fue un arquitecto con una trayectoria profesional equilibrada en una época (1924-1964) sin grandes alegrías económicas. Escrito en la década de 1930 (con algunos añadidos en ediciones posteriores), *Cómo debo...* recoge la tradición constructiva de la época en Barcelona y parte de Cataluña. Fue el libro con el que aprendieron construcción las generaciones de profesionales de la arquitectura que acabaron sus estudios antes de la década de 1980. Sigue siendo el mejor documento de esa tradición ya prácticamente desaparecida. A pesar de

todo, es inexcusable citarlo aquí ya que bastantes de sus principios siguen siendo válidos.

Elder, Albert Joseph (ed.), *AJ Handbook of building enclosure*, The Architectural Press, Londres, 1974; (versión castellana: *Construcción*, Blume, Madrid, 1977).

Ha sido el primer texto de construcción traducido y publicado en castellano que ha planteado su desarrollo mediante el esquema predecesor del de exigencias-prestaciones y que ha servido de base para la concepción inicial de estos tres tomos. El Código Técnico de la Edificación ha hecho obligatorio dicho esquema. Su lectura sigue siendo útil sólo si se tiene en cuenta su lejanía en el tiempo y las diferencias en cultura tecnológica.

Allen, Edward, *How buildings work*, Oxford University Press, Nueva York, 1980; (versión castellana: *Cómo funciona un edificio* [1981], Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 2002⁸).

A pesar de ser un documento de la técnica constructiva anglosajona, su orientación hacia lo esencial comporta que la mayoría de los principios que exponen sean de validez general. Pese a adolecer de una estructura poco clara, su aparición en castellano supuso un cambio muy importante en nuestra manera de abordar la enseñanza básica de la construcción, que sigue vigente en parte.

Paricio, Ignacio, *La construcción de la arquitectura*, 3 vols., Institut de Tecnologia de la Construcció, Barcelona, 2004⁴.

Es uno de los pocos tratados contemporáneos, y el primero en nuestro país, que da al saber constructivo un auténtico sentido arquitectónico. El primer tomo relaciona las técnicas de puesta en obra con el objetivo de durabilidad, el segundo, los elementos con parte de las razones del uso, y el tercero, la estructura portante con la composición general del edificio. La gran imaginación y sensibilidad del autor consiguen que esta ordenación de los conteni-

dos, que tiene sus raíces en la versión fragmentadora de la tríada vitruviana, no sea en absoluto un impedimento para alcanzar el sentido arquitectónico de la construcción. Las múltiples referencias históricas revalorizan las técnicas tradicionales y proporcionan una nueva visión, mucho más matizada, del paso de la construcción histórica a la contemporánea, lo cual conlleva una saludable cura de los excesos de los optimismos tecnológicos de la modernidad.

Otros textos generales

Ching, Francis, *A visual dictionary of architecture*, Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1995; (versión castellana: *Diccionario visual de arquitectura* [1997], Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 2006).

Chudley, Roy, *Building construction handbook* [1988], Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2004; (versión castellana: *Manual de construcción de edificios* [1995], Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 2006²).

Ferri, Jaime, *Apuntes de iniciación a la construcción*, Club Universitario, San Vicente (Alicante), 2001.

Monjo, Juan (coord.), *Tratado de construcción. Sistemas*, Munilla-Lería, Madrid, 2002.

Monjo, Juan (coord.), *Tratado de construcción. Fachadas y cubiertas*, 2 vols., Munilla-Lería, Madrid, 2003 y 2007.

Monjo, Juan, *El detalle constructivo en arquitectura*, Munilla-Lería, Madrid, 2007.

Palaia, L., *Aprendiendo a construir la arquitectura*, Editorial de la UPV, Valencia, 2003.

Schmitt, Heinrich, *Hochbaukonstruktion*, Friedr. Vieweg & Son, Wiesbaden, 1993; (versión castellana: *Tratado de construcción* [1998], Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 2006⁷).

Weston, Richard, *Materials, form and architecture*, Laurence King, Londres, 2003; (versión castellana: *Materiales, forma y arquitectura*, Blume, Barcelona, 2003).

Obras monográficas

Gordon, J. E., *Structures or why things don't fall down* [1978], Da Capo Press, Nueva York, 2003; (versión castellana: *Estructuras o por qué las cosas no se caen*, Calamar, Madrid, 2004).

Monjo, Juan, *Patología de cerramientos y acabados arquitectónicos*, Munilla-Lería, Madrid, 1994.

Neila, Francisco Javier, *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*, Munilla-Lería, Madrid, 2004.

Serra, Rafael, *Arquitectura y climas*, Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 1999.

Serra, Rafael; Coch, Helena, *Arquitectura y energía natural*, Edicions UPC, Barcelona, 2001.

Solanas, Toni, *Vivienda y sostenibilidad en España*, vol. 1: *Unifamiliar*, Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 2007.

BIBLIOGRAFÍA AMPLIADA

Obras generales

Alread, Jason, *Design-tech. Building science for architects*, Architectural Press, Oxford, 2007.

Allen, Edward, *Fundamentals of building construction. Materials and methods*, John Wiley & Sons, Nueva York, 2004⁴.

Allen, Edward, *Architectural detailing. Function, constructibility, aesthetics*, John Wiley & Sons, Hoboken (Nueva Jersey), 2007².

Ching, Francis, *Guía de construcción ilustrada*, Limusa-Wiley, Ciudad de México, 2004³.

Fleming, Eric, *Construction technology. An illustrated introduction*, Blackwell Publishing, Oxford, 2005.

Reid, Esmond, *Understanding Buildings. A multidisciplinary approach*, Construction Press, Londres, 1984.

Torricelli, Maria Chiara; Del Nord, Romano; Felli, Paolo, *Materiali e tecnologie dell'architettura*, Laterza, Roma, 2008⁸.

Vittone, René, *Bâtir. Manuel de la construction*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausana, 1996.

Obras monográficas

Eldridge, Henry J., *Common defects in buildings*, H. M. Stationery Off, Londres, 1976; (versión castellana: *Defectos comunes*, Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 1982).

Evans, Martin, *Housing, climate and comfort*, The Architectural Press, Londres, 1980.

González, José Luis; Casals, Albert, *Gaudí y la razón constructiva. Un legado inagotable*, Akal, Madrid, 2002.

Salvadori, Mario, *Why buildings stand up. The strength of architecture*, W. W. Norton & Co., Nueva York, 1990.

Seward, Derek, *Understanding structures. Analysis, materials, design*, Palgrave Mac Millan, Nueva York, 2003.

Quintanilla, Miguel Ángel, *Tecnología. Un enfoque filosófico*, EUDEBA/FUNDESCO, Buenos Aires/Madrid, 1991.

St. John Wilson, Colin, *Architectural reflections. Studies in the philosophy and practice of architecture*, Butterworth Architecture, Oxford, 1992.

Scruton, Roger, *The aesthetics of architecture*, Princeton University Press, Princeton (Nueva Jersey), 1979; (versión castellana: *Estética de la arquitectura*, Alianza Editorial, Madrid, 1985).

Tedeschi, Enrico, *Teoría de la Arquitectura*, Nueva Visión, Buenos Aires, 1982.

Zevi, Bruno, *Architettura in nuce*, Istituto per la Collaborazione Culturale, Venecia/Roma, 1964; (versión castellana: *Architettura in nuce Una definición de arquitectura*, traducción de Rafael Moneo, Aguilar Ediciones, Madrid, 1969).

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

Bunge, Mario Augusto, *Treatise on Basic Philosophy*, vol. VII: *Philosophy of Science and Technology*, Reidel, Dordrecht, 1985.

Casals, Albert, *El arte, la vida y el oficio de arquitecto*, Alianza Editorial, Madrid, 2002.

González, José Luis, *El legado oculto de Vitruvio. Saber constructivo y teoría arquitectónica*, Alianza Editorial, Madrid, 1993.

Este libro constituye, junto con la entrada bibliográfica anterior, la base ideológica principal de este texto. Incluye más de trescientas referencias bibliográficas sobre las obras que han determinado la configuración histórica y actual de los libros de construcción arquitectónica.

Identificación fotográfica

Obras fotografiadas

- p.19. Edificio de viviendas en Sant Pol de Mar (Barcelona). Casals, Falcones, González, arquitectos, 1996.
- p.22. Edificio del Servicio Meteorológico y Demarcación de Costas en la Villa Olímpica de Barcelona. Álvaro Siza Vieira, 1992.
- p.23. Rampa de acceso al Casal d'Avis de Terrassa (Barcelona). Casals, Falcones, González, arquitectos, 1995.
- p.28a Sección del cuerpo principal de la Casa de la Caritat de Barcelona durante su derribo parcial en 1991. Construida en varias fases a lo largo del siglo XIX según el proyecto de varios maestros de obras, entre ellos Oriol Mestres.
- p.28b La famosa Ville Savoie de Le Corbusier, 1931.
- p.29a Santa Maria del Mar, Barcelona, s. XIV.
- p.29b Nave del Pavelló de la Mercè del Hospital de Sant Pau, Barcelona, obra original del arquitecto Lluís Domènech i Montaner proyectada en 1902. La remodelación acoge el Servicio de Obstetricia y se realizó en 1981 según proyecto y dirección de A. González, V. Argentí, y J. L. González.
- p.30 Fachada del edificio Caja Madrid, Barcelona. Enric Tous y Josep M. Fargas, 1993.
- p.43 Maison Carré, Nîmes, siglo I a. de C.
- p.44 Catedral de León, siglos XIII-XIV.
- p.45a Cobertizo en el paseo de la Vila Olímpica de Barcelona. O. Bohigas, J. Martorell, D. Mackay, A. Puigdomènech, 1992.
- p.47a Estructura de la cubierta del Palau Sant Jordi, Barcelona. Arata Isozaki, 1990.
- p.47b Puente sobre la Ronda Litoral en la Villa Olímpica de Barcelona. O. Bohigas, J. Martorell, D. Mackay, A. Puigdomènech, 1992.
- p.48 Piscina en La Barceloneta, Barcelona. J. A. Martínez Lapeña, E. Torres, 1995.
- p.54 Fuente monumental del Anillo Olímpico de Barcelona. F. Correa y A. Milá, 1990.
- p.58 Íd., p.47a.
- p.123a Torre Mapfre, Villa Olímpica de Barcelona. Íñigo Ortiz y Enrique León, 1992.
- p.123b Hotel de les Arts, Villa Olímpica de Barcelona. Bruce Graham (Skidmore, Owings & Merrill), 1992.
- p.164a y b Pérgola en la plaza A. C. Comín, Barcelona. V. Rahola, 1992.
- p.188a Esquina del Colegio de las Teresianas en Barcelona. Antoni Gaudí, 1890.
- p.188b y e Muro de cerca de la Facultad de Ciencias Económicas de la Universidad de Barcelona. G. Giráldez, P. L. Iñigo, X. Subias, Barcelona, 1967.
- p.190a Muro lateral de edículo aislado para bar restaurante en el Moll de la Fusta, Barcelona. Manuel de Solà-Morales, 1987.
- p.190b Fachada de la Universidad de Barcelona. Elías Rogent, 1889.
- p.190c Casa de los Botines, León. A. Gaudí, 1893.
- p.190d Edificio del Reloj de la fábrica Batlló. Rafael Guastavino, 1869.
- p.191a Aeropuerto de Sevilla. Rafael Moneo, 1991.
- p.191b Ampliación de la Escuela Superior de Arquitectura de Barcelona. J. A. Coderch, 1980.
- p.191c Instituto Francés. J. A. Coderch, 1975.
- p.192c Íd., p.191a.
- p.192d Íd., p.47a.
- p.193a Íd., p.191b.
- p.193b Edificio de viviendas, Barcelona. Rafael Guastavino, 1868.
- p.194b Edificio de viviendas, Barcelona. Raimon Duran i Reynals, 1935.
- p.194d Casa Macaya en Barcelona. Josep Puig i Cadafalch, 1901.
- p.195a Íd., p.23.
- p.195c Casa de Alturas, actual sede del distrito municipal Horta-Guinardó, Barcelona. Víctor Argentí, con colaboración de Casals, Falcones, González, arquitectos, 1989.
- p.196a Íd., p.28b.
- p.197a y b Convento de La Tourette. Le Corbusier, 1960.

- p.197c Íd., p.22.
- p.198a Edificio para la Universitat Pompeu Fabra, Barcelona. Josep Benedito, Jaume Llobet, 1993.
- p.198b Edificio L'illa, Barcelona. Rafael Moneo, Manuel de Solà-Morales, 1993.
- p.199a Íd., p.47a.
- p.199b Hotel Plaza, Barcelona. Jordi Garcés y Enric Sòria, 1993.
- p.199c Íd., p.123b.
- p.199d L'Auditori, Barcelona. Rafael Moneo, 1999.
- p.200a Rascacielos de vidrio para el concurso de la Friederichstrasse. Mies van der Rohe, 1919.
- p.200b Íd., p.30.
- p.201d Aeropuerto de Barcelona. Ricardo Bofill, 1992.
- p.203 Escuela pública "Arquitecte J. M. Jujol", Barcelona. J. Bach y G. Mora, 1987.
- p.204a Viviendas en la Villa Olímpica Xemenia de Can Folch, Barcelona. J. Martorell, O. Bohigas, D. Mackay, y A. Puigdomènech, 1991.
- p.204c Viviendas en la Vila Olímpica, Barcelona. Oscar Tusquets y Carles Díaz, 1992.
- p.204d Íd., p.19.
- p.204e Íd., p.204a.
- p.205a Remodelación de la fachada de El Corte Inglés, Barcelona. J. A. Martínez Lapeña, E. Torres, 1993.
- p.205b Íd., p.22.
- p.205c Escuela T. S. de Ingeniería de Telecomunicaciones. Campus Nord de la UPC, Barcelona. V. Rahola, 1992.
- p.205d Íd., p.123a.
- p.206a Íd., p.44. Obviamente, León no es una ciudad centroeuropea, pero su catedral responde en gran parte a los criterios con los que se construyeron las catedrales francesas.
- p.206b Íd., p.29a.
- p.206c Fachada de La Llotja, Barcelona. J. Soler i Faneca, 1772.
- p.207b Biblioteca en Rovaniemi, Laponia, Finlandia, Alvar Aalto, 1968.
- p.207c Biblioteca del Campus Nord de la UPC Barcelona. Ramon Artigues y Ramon Sanabria, 1996.
- p.208a El Patio de los Leones de La Alhambra de Granada, siglo xiv.
- p.208b Edificio de oficinas en Barcelona, Jaume Sanmartí, 1995.
- p.209a Casa de la Cascada en Bear Run (Pennsylvania, EEUU). Frank Lloyd Wright, 1936.
- p.209b Casa en Llaveneres (Barcelona), Javier Barba, 1984.
- p.210b Viviendas en la Villa Olímpica, Barcelona. M. S. Godia, J. Urgell, P. de la Villa, 1992.
- p.211a y b Íd., p.201d.
- p.211c Estación de ferrocarril de Kassel (Hesse, Alemania).
- p.212 Catedral de Beauvais (Picardia, Francia), siglos XIII a XVI.
- p.213a reproducción de la maqueta hecha por Gaudí; y b interior de la Cripta de la Colonia Güell en Santa Coloma de Cervelló, (Barcelona). Antoni Gaudí, 1914.
- p.214 Íd., p.43.
- p.215a Notre Dame de París, siglos XII-XIV.
- p.215b Catedral de Sevilla, siglo xv.
- p.215c Íd., p.206c.
- p.216 Remodelación de la piscinas Picornell, Barcelona, F. Fernández y M. Gallego, 1991.
- p.217a Museo de Arte Contemporáneo de Barcelona, Richard Meyer y Fernando Ramos, 1995.
- p.217b Íd., p.19.

Autores de las fotografías

J. Barba, 209b; X. Casanovas, 133a; J. Eldridge (1982), 55, 64c, 134a, 135b, 139, 140b, 141, 142, 143b; DCAI, 46a y b, 49, 60a y b, 133b, 135a, 138, 165, 169, 170, 171a, 172, 173, 174, 177a, b y c, 178a y b, 179a y b, 180a y b, 181a y b, 188b y d, 191c, 201d, 211a y b; A. Falcones, 23, 45c; J. L. González, 19, 21, 22, 28a y b, 29a y b, 30, 43, 44, 45a y b, 47a y b, 48, 54, 58, 61c, 62, 64a y b, 123c y d, 140a, 143b, 164a y b, 171b y c, 188a y c, 189a, b, c y d, 191 a y b, 192a, b, c y d, 193a, b y c, 194a, b, c y d, 195a, b y c, 196, 197a, b y c, 198a y b, 199a, b, c y d, 200, 201a, b y c, 203, 204a, b, c, d y e, 205a, b, c y d, 206 a, b y c, 207a y c, 208b, 209a, 210a y b, 211c, 212, 213a y b, 214, 215c, 216, 217a y b; R. González, 208a, 215a y b; J. R. Rosell, 157, 158a y b, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 166; I. Sanfeliu, 207b.

Dibujos

A. Falcones y J. L. González.

Agradecimientos

Un libro como este, que abarca tantos campos y extrae lo esencial de cada uno de ellos, requiere el concurso directo o indirecto de muchas personas. Los autores están en deuda con todas ellas, especialmente con las que a continuación se citan. En primer lugar, con todos los profesores de los dos Departamentos de Construcción Arquitectónica, I y II, de la Universitat Politècnica de Catalunya, que de diferentes maneras han influido o influyen, después de muchos años de trato, en nuestros conocimientos y mentalidades. Queremos citar personalmente, por su colaboración directa como profesores de Construcción I, a Antoni Carrió, Santiago Fuentes y Ignaci Sanfeliu; por su predisposición al diálogo y debate productivo, a Josep Ignasi Llorens, Jaume Avellaneda, Joan Lluís Fumadó, Francesc Daumal, Félix Pardo, Justo Hernanz, César Díaz y Josep M^a González Barroso, especialmente a los dos últimos por su directa colaboración en diversos momentos de la elaboración del trabajo. A Pere Roca del Departamento de Ingeniería de la Construcción, con el que se comparte, también con gran provecho propio, los estudios sobre edificios históricos. Debemos hacer una mención especial a Francesc Bassó, arquitecto, que fue el primer profesor de Introducción a la Construcción en la ETSAB y cuyos programas y apuntes, con su voluntad de exhaustividad, han servido de guía en muchas ocasiones. Por último, a todos los autores que figuran en la bibliografía que, a través de sus escritos, han aportado una base firme desde la cual avanzar con seguridad.

Notas biográficas

José Luis González Moreno-Navarro (1945) es doctor arquitecto y catedrático de Universidad. Es profesor de Construcción en diversas asignaturas de la Escuela de Arquitectura de Barcelona, desde las de introducción básica a las de Proyecto Fin de Carrera y Doctorado pasando por la participación en Talleres de Proyectos. En la actualidad es responsable de Construcción I. Ha desarrollado para la presente edición todos los cambios derivados de la aplicación del CTE. En el ámbito profesional ha colaborado con diversos arquitectos en trabajos que han merecido premios como el FAD, entre otros. En equipo con Albert Casals, realiza proyectos de nueva planta además de obras y estudios para la restauración de edificios históricos.

Albert Casals Balagué (1941) es doctor arquitecto, aparejador y profesor titular de Universidad. Imparte clases de construcción en asignaturas obligatorias y optativas de 1^{er} y 2^o ciclo en la Escuela de Arquitectura de Barcelona. Su experiencia profesional abarca el proyecto y la construcción de los tipos de edificios habituales, obras de urbanización, el planeamiento urbanístico y la restauración de edificios históricos.

Alejandro Falcones de Sierra (1955) es arquitecto, aparejador y profesor titular de Escuela Universitaria. Imparte clases de Instalaciones en la Escuela Universitaria Politécnica de Barcelona y también de tutoría en Trabajos Final de Carrera. Su trayectoria profesional comprende la especialidad de instalaciones, que ha dado lugar a diversas publicaciones, y el proyecto y construcción de edificios usuales y la restauración de edificios históricos.

