

LA CONSTRUCCIÓN DE LA ARQUITECTURA

Ignacio Paricio

1 Las técnicas



ITeC

ÍNDICE

Presentación	5
0. Construcción y arquitectura	7
0.1 La construcción, soporte físico de la arquitectura	9
PRIMERA PARTE	
Los movimientos de la construcción. El edificio vivo	11
1. Los movimientos de origen mecánico	13
1.1 La ley de Hooke y la construcción	13
1.2 La indisoluble relación tensión-deformación	14
1.3 Las diferencias de tensión	15
1.4 Las diferencias de módulo de elasticidad	18
1.5 La inversión del proceso. De las deformaciones a las tensiones	19
1.6 La ley de prioridad en el descenso de cargas	20
2. Los movimientos de origen térmico	25
2.1 El módulo de deformación térmica lineal	25
2.2 Las variaciones de temperatura	26
2.3 Cuantificación de los movimientos térmicos	26
2.4 Los movimientos diferenciales	27
2.5 Dos actitudes frente a los movimientos	28
2.6 La importancia de construir en primavera o en otoño	30
3. Los movimientos provocados por cambios de humedad	33
3.1 Breve historia de un muro	33
3.2 Cuantificación de los movimientos provocados por cambios de humedad	39
3.3 La heterogeneidad de la construcción	42
SEGUNDA PARTE	
Las técnicas de la construcción y la forma de los materiales	43
Clasificación de los materiales de construcción por su forma	43
La forma de los materiales	44
El tamaño de los materiales	45
La conformabilidad	46
Las técnicas de transformación y la forma de los materiales	47
Técnicas que se aplican a los materiales amorfos	47
Técnicas de puesta en obra de los materiales conformados	50
Aspectos fundamentales de las técnicas de ejecución	51
4. El moldeo	53
4.1 La plasticidad	53
4.2 La cohesión	54
4.3 Moldes o encofrados	55
4.4 El hormigón: material compuesto	56
4.5 Exigencias de la puesta en obra del hormigón	57

0. Construcción y arquitectura

La desvinculación entre la técnica constructiva y el proceso de proyecto arquitectónico se acepta hoy con tanta naturalidad que no es banal recordar la estrecha relación entre técnica y proyecto que ha existido durante casi toda la historia de la arquitectura.

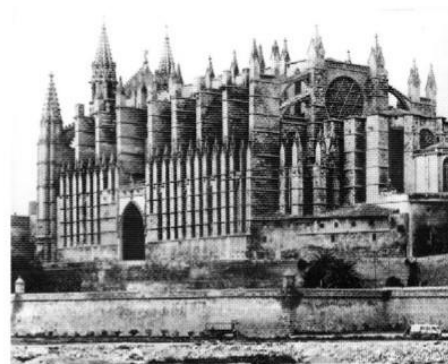
No se va a reivindicar en estos textos una esquemática producción mecanicista de la forma en función de las exigencias técnicas, pero sí se defenderá la importancia de las consideraciones constructivas desde el primer momento del proyecto. La construcción como condición necesaria, que no suficiente, de la arquitectura incide por lo menos de dos maneras en el hecho de proyectar. La primera, creando unos límites razonables al proyecto; hoy, cuando todo parece técnicamente posible, esta condición resulta más importante que nunca. Cualquier alarde es posible, pero sólo algunas opciones son razonables; y, generalmente, lo más razonable es no sólo lo más duradero, sino lo que se expresa con un vocabulario formal más consistente. No debe entenderse esta aproximación a la construcción, entendida como límite razonable, como castración de la composición arquitectónica, sino todo lo contrario. Nunca ha sido tan fructífero el diseño como frente a las barreras, ni tan sutil como entre las pautas y los modelos.

La segunda incidencia de la construcción en el diseño es directamente creativa. El repertorio de sugerencias formales que aporta es inagotable. La importancia de un proyecto reducido a una imaginaria cada vez más críptica, ensimismada y banal en sus referencias materiales contrasta con la riqueza de las formas de la construcción, una riqueza que se alimenta de las experiencias de la tradición y se amplía con las sugerencias de las nuevas lógicas constructivas.

Es demasiado frecuente que las exigencias técnicas se superpongan a un proyecto ya muy desarrollado en sus aspectos funcionales y formales, para darle una mínima viabilidad constructiva. Raramente se introducen los componentes técnicos de la forma como un elemento más, configurador desde los momentos iniciales, los más definitorios, de la síntesis arquitectónica.

Para comprender mejor lo extraño, lo aberrante de esta situación actual, será necesario distanciarnos de ella, contemplarla con cierta perspectiva histórica. En efecto, este planteamiento jerárquico de la síntesis arquitectónica que desplaza la construcción de los momentos críticos del proyecto no es casual ni fruto de factores coyunturales, sino que es el resultado de la destrucción, a lo largo de cuatro siglos, de un proyecto clásico: el que establece la tríada de Vitrubio.

La construcción ha sido, tradicionalmente, una parte absolutamente integrada en el todo de la arquitectura. Esta relación se ha entendido, durante siglos, a través de la expresión vitrubiana de las tres exigencias que el edificio debía satisfacer. El edificio debe ser firme, útil y bello. Ninguno de los tres aspectos podía ser tomado en consideración con independencia de los otros, y sólo en su equilibrada satisfacción estribaba la calidad del trabajo del arquitecto.

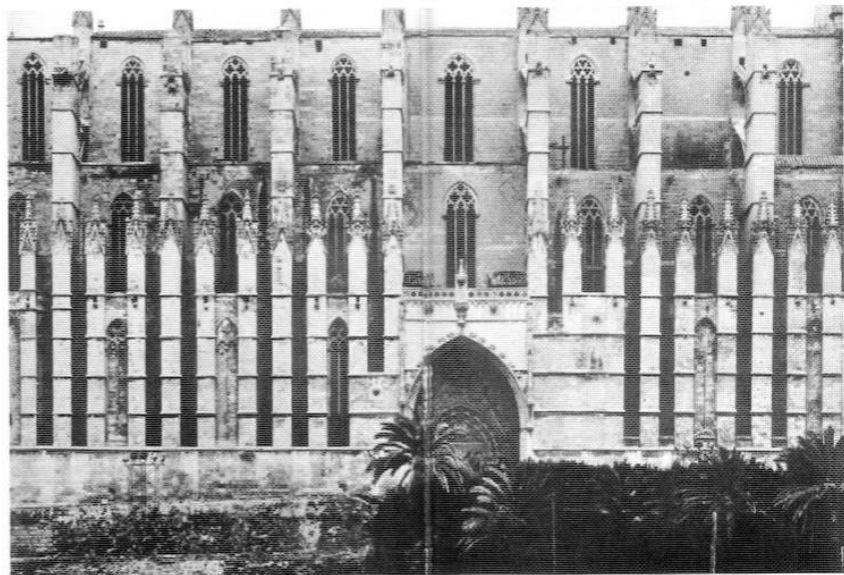


1. La fachada lateral de la catedral de Mallorca constituye un claro ejemplo de síntesis de las exigencias constructivas y de composición arquitectónica. Los empujes de la nave central exigen unos recios y profundos contrafuertes externos. Los aristones de las capillas laterales transmiten su empuje inclinado a unas pilastras también externas. La bellísima composición de esta fachada recoge todos estos elementos de contrarresto, cada uno con la altura necesaria, y recompone con todos ellos un plano, una fachada lateral inexistente en la mayor parte de las catedrales góticas, pero fundamental aquí, en su prodigiosa situación frente al mar.

La interpretación contemporánea de aquella tríada supone una sociedad, unas instituciones o unas personas que necesitan un entorno adecuado para el ejercicio de determinadas funciones (*utilitas*). La estructura espacial que crea ese entorno útil será realizada con unos materiales y unas técnicas (*firmitas*). Ambos componentes fundidos y sometidos a la cultura plástica del momento (*venustas*), constituyen lo que se llama la arquitectura.

A lo largo de dieciséis siglos, el equilibrio vitrubiano es respetado de una manera natural con notable fidelidad. De la arquitectura romana a la gótica, la historia nos ofrece los mejores ejemplos de ese deseado equilibrio. ¿Quién se atrevería a decir dónde se acaba la composición y comienza la construcción estructural en los contrafuertes de la catedral de Mallorca? (fig.1 y 2).

Aunque en gran parte de la práctica edificatoria y sobre todo en la arquitectura con menos ambiciones cultas esa relación perdura hasta el siglo XIX, entre los tratadistas el equilibrio se rompe después de Alberti. Los autores posteriores sólo se interesan por el tercer término de la ecuación: la composición basada en criterios exclusivamente estéticos. Así, los tratados de Vignola y de F. Blondel, y sobre todo la escandalosa censura de la versión francesa de Scamozzi, apadrinada por la *Académie d'Architecture*¹, señalan el giro radical en el planteamiento de los objetivos de la obra arquitectónica. El papel de la Academia Francesa, fundada en 1672, no es casual. Según Quaroni, "la delectación estética, absorbida casi en su totalidad por las reglas de los órdenes clásicos, ya no se considera la finalidad y la coronación de los niveles precedentes. Pero sin ellos no podría existir, ninguna belleza puede obtenerse desde el momento en que no son previamente aplicadas y respetadas las reglas de la firmeza y la utilidad"².



2. El zócalo continuo, las molduras que llegan a dibujar unas impostas horizontales, el ritmo de vacíos y macizos que se rompen en el contrapunto de la puerta lateral son posibles por la reconversión compositiva de esos elementos constructivos que alguien calificó de *muletas* del gótico.

Frente a la parcialización estética, nace la parcialización tecnológica. La fundación, en Francia, de l'*Académie des Sciences* (1671), del *Corps de Genie Civil* (1672) y, posteriormente, de las escuelas de *Ponts et Chaussées* (1747) y *Polytechnique* (1795) culmina la profesionalización de esta división. En el año 1802, la publicación del *Art de Bâtir* de Rondelet abre la serie, y sirve de modelo, de todos los tratados exclusivamente técnicos que se publican a lo largo del siglo XIX.

Los contenidos se radicalizan progresivamente y, hoy, la literatura técnica, increíblemente especializada, es absolutamente ajena al mundo de la composición arquitectónica y a sus necesidades. En el otro extremo, una élite cultural se encierra en un intercambio de imágenes cada vez más lejos de los aspectos materiales de la edificación y llega a hacer objeto de su producción al mero anteproyecto arquitectónico. La *arquitectura dibujada*, la *arquitectura de papel*, la que no tiene más soporte físico que el trazado del lápiz, tiene, en la actualidad, un éxito tan amplio como peligroso.

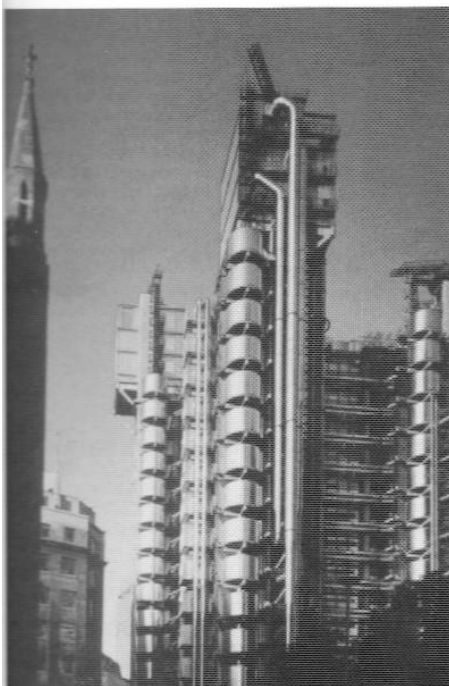
0.1 La construcción, soporte físico de la arquitectura

La divergencia histórica que se ha esbozado, esa auténtica y progresiva esquizofrenia, constata el deterioro de la difícil síntesis vitrubiana entre los tres componentes que deben estar siempre presentes en la mente del que proyecta. La recomposición de ese equilibrio supondría una difícil "resolución íntegra del problema, sin simplificaciones que no sean las exigidas por el mismo proceso creativo, es decir, sin reducciones demasiado fáciles que podrían dejar fuera de juego algún elemento poco importante en apariencia, pero que podría actuar como catalizador de la reacción proyectual"³. Quaroni sigue exigiendo que el trabajo del proyecto "no deje nada fuera, lo integre todo evitando el considerar, como pasa frecuentemente, que lo único importante sea la consecución del resultado estético. Este resultado no se ha de buscar directamente, al margen de toda consideración sobre la utilización y la tecnología (que se dice que se abordarán más tarde, una vez conseguida la forma) haciendo uso sólo del bagaje de las imágenes de más éxito y de algunas reglas sencillas de la geometría".

Para avanzar en este camino, aunque sea mínimamente, ha sido redactado este libro, que intenta recorrer los temas fundamentales de la construcción, pero tratándolos siempre desde el punto de vista de su vinculación con el proyecto arquitectónico. ¿Cuál es esa construcción que ha de *fundirse*, *resolverse* y *disolverse* en la realidad arquitectónica?

Las propias reglas de la construcción, las técnicas establecidas para la conformación de un volumen sólido a partir de diferentes materiales, pertenecen muy directamente al mundo físico, forman parte del reino de la necesidad y constituyen, por sí solas, los elementos de satisfacción del primer nivel de exigencia: *la firmitas*. A estos temas dedicaremos este primer volumen de nuestro libro: *Las Técnicas*.

Con estas reglas se puede levantar una sólida construcción, pero si esa obra ha de albergar un espacio, ha de permitir y proteger el ejercicio de ciertas actividades, aparecerán otras exigencias, de confort, por ejemplo. La construcción colabora también a la satisfacción de esas exigencias consiguiendo espacios estan-



3. La sede central de la Lloyds en Londres, de Richard Rogers, es un paradigma de las virtudes y defectos de la *high tech*, una corriente contemporánea que hace de la exhibición de las razones constructivas una iconografía a veces caricaturesca.

cos, iluminados, etc. Pero entre las exigencias de la *utilitas* y las de la técnica constructiva pueden surgir algunos conflictos que exigirán pactos y síntesis. Recuérdese, por ejemplo, la dificultad de hacer una cubierta estanca con materiales en perpetuo movimiento debido a, la deformación térmica, o los conflictos que plantea la ventana como hueco que, una vez cerrado, debe satisfacer las mismas exigencias que el muro en el que se abre.

Dedicaremos el segundo volumen de la obra a recorrer toda esa riquísima variedad de elementos constructivos (fachadas, muros, cubiertas, etc.) que la construcción brinda a la arquitectura para que forme el vocabulario constructivo: *Los Elementos*.

Pero ese edificio construido se incorpora al sistema de signos con los que cada cultura define el código de calidad, las normas de la belleza, *la venustas*. También en este nivel, las normas constructivas tienen importancia y se incorporan, con conflictos a veces muy graves, a la síntesis final que calificará definitivamente el espacio arquitectónico, que intentará satisfacer el tercer nivel de exigencia. A estas relaciones entre construcción y composición arquitectónica se dedicará el tercer volumen de esta colección: *La Composición*.

La construcción aparece así como un componente intrínseco de cada uno de los niveles exigibles a la arquitectura, a los que aporta todo lo que suponen sus componentes, y para los que es el soporte físico de la arquitectura.

SEGUNDA PARTE

Las técnicas de la construcción y la forma de los materiales

Cualquier edificio está constituido por una gran variedad de materiales que adoptan en él una forma determinada y prestan sus virtudes características para que cada elemento constructivo satisfaga las más diversas funciones.

Para construir es necesario, pues, modificar la forma de esos materiales adecuándola a la que se ha previsto que tengan en el edificio y luego ensamblarlos correctamente para conseguir el comportamiento solidario exigido por Alberti.

Las técnicas de la construcción tienen como objetivo fundamental esa conformación y ese ensamblaje que debe prever las dificultades planteadas por los movimientos diferenciales que hemos analizado. Las técnicas no serán las mismas si el material llega a la obra formado por grandes piezas o por una pasta moldeable. En ambos casos será diferente tanto el proceso de conformación como los mecanismos utilizados para conseguir que la obra quede *entera y unida*.

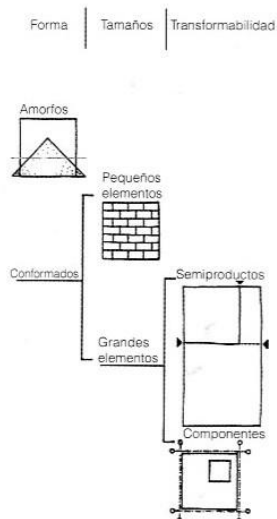
Clasificación de los materiales de construcción por su forma

La idea arquitectónica se transforma en construcción mediante el montaje conjuntado de numerosos tipos de materiales que se someten a diversas manipulaciones para dar al resultado edificado la calidad funcional y formal exigida. Todos los materiales sufren hoy algún tipo de manipulación más o menos compleja antes de llegar a la obra y llegan a ésta como productos semielaborados. En este texto no hablaremos de estas modificaciones previas, sino específicamente de las técnicas que se utilizan en la obra para levantar un edificio con estos materiales tan diversos.

El proceso de construcción exige, pues, una manipulación física de los materiales, que consigue que éstos adopten una forma concreta y conformen una parte específica del edificio, donde cumplirán la función que les haya sido encomendada.

La hipótesis central de este libro es que esta manipulación, que constituye la esencia de la técnica edificatoria, adoptará sistemas muy diferentes según el tipo y, sobre todo, según la forma del material de que se trate.

Un pilar de hormigón vertido en obra, otro de ladrillo o un tercero elaborado con perfiles metálicos exigirán técnicas de construcción muy diferentes, mucho más alejadas entre sí de lo que su común función final de soporte sugeriría. Sin embargo, ese llenado del pilar está muy próximo a cualquier llenado con hormigón, y las normas de la albañilería que requiere la colocación del ladrillo serán las mismas que las de un muro portante, incluso aunque éste se lleve a cabo con bloques de hormigón.



1. Clasificación de los elementos constructivos según su forma al llegar a la obra.

Estas consideraciones sugieren la necesidad de acercarse a las técnicas de transformación de los materiales a través de la forma que éstos tienen al llegar a la obra. Supondremos que son esas características formales las que van a definir las técnicas de construcción que hay que aplicar en cada caso, y en función de este objetivo clasificaremos los materiales de construcción (fig. 1).

La forma de los materiales

La primera característica que se ha de considerar es, precisamente, la presentación, por parte del material que llega a una obra, de una forma definida. Muchos materiales, tradicionales y modernos, han llegado a la obra como polvos, líquidos, pastas, etc., sin forma definida. Podemos, atendiendo a ello, llamarlos amorfos o, más correctamente, no conformados (fig. 2).

Casinello califica el hormigón, el más importante de los materiales de este grupo, de *formaceo* que tiene la ventaja de añadir la connotación de su *capacidad de ser conformado* (fig. 3). Dentro de este grupo estarán, pues, el cemento, la arena, la cal, el yeso, el mortero, el hormigón, las pinturas, las colas, las espumas de expansión en obra, etc.

Todos los demás materiales, los que presentan una forma definida al llegar a la obra, serán los conformados. Consideraremos conformados tanto el ladrillo como el tubo fluorescente, el perfil metálico o la pieza sanitaria.



2. El cemento, como el yeso, el hormigón y otros, es un material que llega a la obra sin tener una forma específica. A este tipo de materiales los llamaremos amorfos, conformables o, según Casinello, *formaceos*.

El tamaño de los materiales

Entre los materiales conformados, el tamaño es el criterio que establece la diferencia fundamental a efectos de la técnica de construcción más adecuada. El peso y el volumen comportan unas ventajas y desventajas que hacen que el montaje de un panel prefabricado sea muy diferente a la yuxtaposición de ladrillos en un muro, por ejemplo.

Es difícil establecer un umbral preciso de diferenciación, pero se puede intentar a partir de las siguientes consideraciones. Muchos materiales, sobre todo los tradicionales, fueron diseñados para ser fácilmente manipulados por el hombre. El prototipo es el ladrillo, que debe poder ser manejado con una mano solamente, pero a su misma escala existe el mampuesto, la teja, el bloque, la bovedilla, las losetas cerámicas, las baldosas, etc. Es necesario reunir muchas unidades de estos materiales para formar un paramento, y siempre plantea problemas la garantía de su comportamiento solidario (fig. 4).

Frente a ellos están los materiales que fueron diseñados a escala de un paramento, aunque no tengan exactamente sus dimensiones. Un paramento de un local normal está, pues, formado por pocas, o una sola, unidades de estos materiales. El ejemplo prototípico son los paneles prefabricados de hormigón, pero también las chapas metálicas, las moquetas, el cartón-yeso y, por extensión, los perfiles metálicos, las jácenas o los pilares prefabricados de hormigón. La altura libre de un piso es la medida preferente para casi todos ellos.

En función de esta consideración, *la adecuación a la manipulación por el hombre o al tamaño del paramento* agruparemos los materiales conformados como *grandes o pequeños* elementos.



3. El cementerio de Igualada, de E. Miralles, explota las posibilidades de conformación del hormigón a partir de un simple molde de acero.



4. Esta obra de los SITE, *Indeterminate Façade*, para un centro comercial en Houston es toda una exhibición de las posibilidades del ladrillo y un ejemplo paradigmático de los pequeños elementos. La pérdida de su identidad en la fábrica de albañilería se recupera aquí espectacularmente en este cuidado derrumbe.



5. Las construcciones con grandes paneles, como ésta de Nadeco en Pamplona, ejemplifican los componentes. Las piezas llegan a la obra totalmente elaboradas y ningún proceso de conformación es posible. Su manipulación se reduce al montaje.

6. Nuevamente la obra de E. Miralles nos sirve para ejemplificar la explotación de las características de transformación y puesta en obra de cada tipo de material. La sala del Circolo de lectores en Madrid muestra las variadas formas del corte de un semiproducto, el contrachapado de madera.

La conformabilidad

Algunos materiales conformados pueden sufrir todavía algún proceso de transformación en obra para adaptarse a las dimensiones del lugar que deben ocupar en el edificio. Este tipo de proceso era muy importante en la construcción tradicional, pues es el que corresponde a la elaboración de los materiales naturales. En este capítulo debe incluirse la talla de la piedra o el corte y trabajo de la madera.

El abandono de esos trabajos, o su traslado a un taller ajeno a la obra, ha reducido su aplicación en el tajo al mero corte de algunas piezas de pequeños materiales, como las plaquetas cerámicas o los ladrillos.

No son éstos, los materiales naturales, los que más nos interesan, sino aquéllos que, siendo grandes conformados, se adecuan por corte a la dimensión exacta del edificio. Forman un capítulo en vertiginosa expansión en la construcción actual, que goza de las ventajas de la producción industrial sin condicionar las dimensiones del edificio. Los llamaremos semiproductos; sus ejemplos más claros son el tablero de aglomerado de virutas, el cartón-yeso, la tela asfáltica, las placas rígidas de aislantes térmicos, los pavimentos vinílicos, etc. (fig. 6).

Los otros grandes conformados, los que no pueden seguir un segundo proceso de conformación en obra, forman el grupo de los componentes; sus ejemplos más claros son el gran panel de hormigón y la gran pieza sanitaria, que no podrán cortarse para adecuarse a la dimensiones de su hueco (fig. 5).



Las técnicas de transformación y la forma de los materiales

La clasificación expuesta en el punto anterior nos será útil para estructurar las técnicas que se aplican a cada uno de los diversos tipos de materiales (fig. 7).

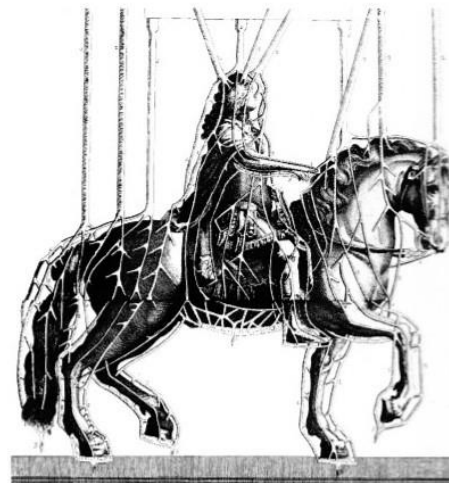
En este primer análisis, incidirá fundamentalmente la primera división establecida en la clasificación anterior, la que distingue los amorfos de los conformados.

Técnicas que se aplican a los materiales amorfos

Los materiales no conformados o formaceos reciben, en la obra y en el lugar que siempre ocuparán, su forma primera y definitiva. La técnica que se utilice para ello depende de su relación de soporte con los elementos constructivos adyacentes y de la velocidad de cambio de su plasticidad.

La primera de estas características, la relación de soporte, va a diferenciar las técnicas de moldeo de las de aplicación. En efecto, cualquier material amorfo necesitará un soporte para su conformación. Si el material llena ese soporte envolvente y adopta la forma de esa vasija, hablaremos de técnicas de moldeo (fig. 8); si el material se extiende, se aplica sobre un soporte superficial y no pierde su forma gracias a la delgadez de la capa extendida y al grado de plasticidad que posee, en ese momento hablaremos de técnicas de aplicación (fig. 9).

forma del material	técnicas		
		volumétricas	superficiales
amorfos	conformación	moldeo	tendido proyectado
conformados	adición	con aglomerantes hidráulicos	albañilería grandes paneles
		sin aglomerantes no hidráulicos	encolado soldadura
	fijación	con clavos con tornillos con tacos con inserciones	chapado



8. Los materiales amorfos sufren en obra un proceso de conformación. Por fraguados hidráulicos, por cambios de temperatura o por otros procesos, los materiales toman la forma deseada. Es fundamental que la velocidad de endurecimiento se adecue al tipo de puesta en obra. Esta es una exigencia general en los procesos de conformación de los materiales amorfos y, por tanto, es válida para el moldeo. Su importancia se extiende a los moldeados en fábrica y en obra. Esta lámina de la *Encyclopédie* de Diderot es un magnífico ejemplo de moldeo de taller. La longitud de los canales de vertido vaciados en el molde, su diámetro, el orden de llenado y los puntos finales de control garantizarán el total macizado del molde según la velocidad de enfriamiento del metal moldeado.

7. Las técnicas de puesta en obra en función de la forma de los materiales.



9. En el tendido, las dificultades aún son mayores porque el material amorfo se conforma sobre una superficie a la que tiene que adherirse. La herramienta, regla, llana, tachola, etc., lamina el material contra el soporte en el mismo momento del fraguado. Es, por tanto, una de las técnicas que mayor habilidad exige.



10. El proyectado es una forma de aplicación de materiales conformables en que la presión de la herramienta y la habilidad del artesano se sustituyen por la energía cinética del lanzamiento. Su uso se está extendiendo rápidamente a productos como morteros, yesos, plásticos espumados, pinturas, etc.

Las técnicas de aplicación

Se aplican gran cantidad de materiales en obra, desde los tradicionales morteros y yesos hasta los plásticos expansivos, las pinturas y las colas.

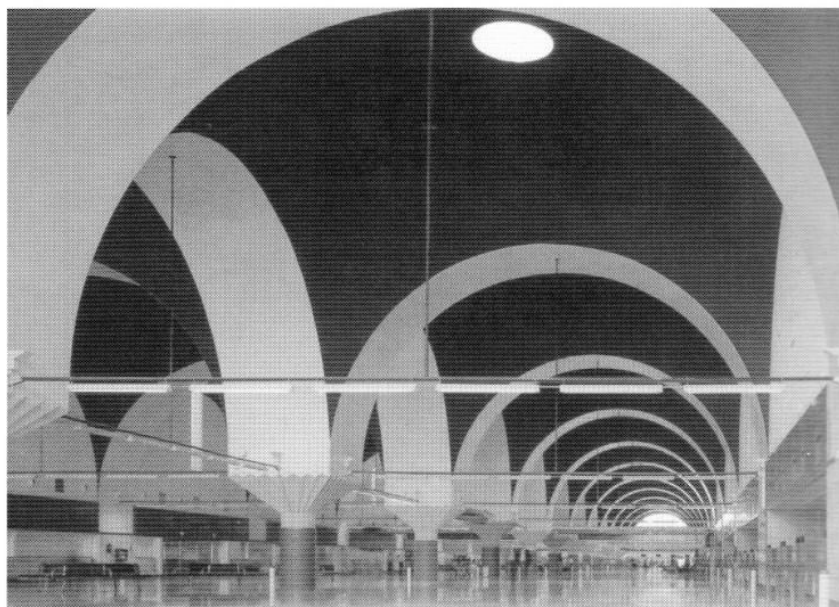
Estudiaremos con un cierto detalle el tradicional tender de morteros y yesos, y con más superficialidad el moderno proyectar de una amplia gama de materiales que abarca todos los anteriores e incluso el hormigón.

Una muestra de la dificultad de estas técnicas es el hecho que en su ejercicio se basa alguno de los oficios más tradicionales, de más irreductible supervivencia dentro de la construcción: el yesero, el estucador. Por otro lado, también se incluyen aquí algunos de los nuevos oficios que están consiguiendo la recalificación del trabajador de la construcción: el proyectador de hormigones, yesos o materiales de aislamiento (fig. 10 y 11).

Las técnicas del moldeo

El moldeo parece ser una de las técnicas más antiguas de la historia de la construcción. Desde el primitivo amasado, transporte y colocación en obra de la tierra con la propias manos hasta el tapial, desde el hormigón romano en su encofrado perdido de *tufo* o ladrillo hasta los encofrados metálicos, el moldeo mantiene una vigencia de la que hoy son muestra técnicas contemporáneas como el encofrado deslizante y el encofrado túnel (fig. 12).

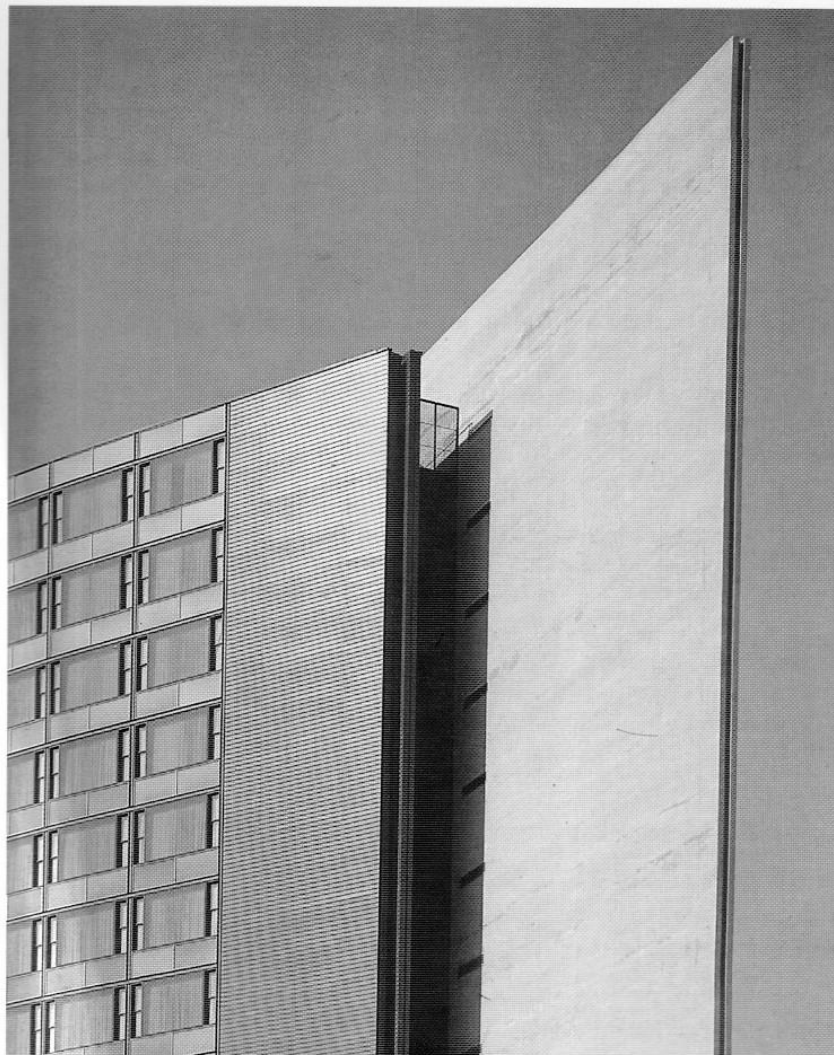
Las increíbles posibilidades del moldeo explican la longevidad de una técnica en principio tan repugnante a la tecnofilia contemporánea. El moldeo permite que un



11. Las bóvedas del aeropuerto de Sevilla, de R. Moneo, fueron posibles gracias a las técnicas de proyectado del hormigón.

material se adecue a su puesto en la obra (no sólo a su forma, sino también a su función), modificando localmente su composición (armaduras, color del cemento, tipo de árido), para responder mejor a la diversidad de exigencias.

El manejo de incómodos volúmenes de una pasta de consistencia incontrolable, la espera de los fraguados, el tejer y destejer de los encofrados, sólo se compensa por esa absoluta ductilidad de los materiales conformables. Pero, como veremos más adelante, la lucha contra el encofrado es larga y dura (fig. 13).

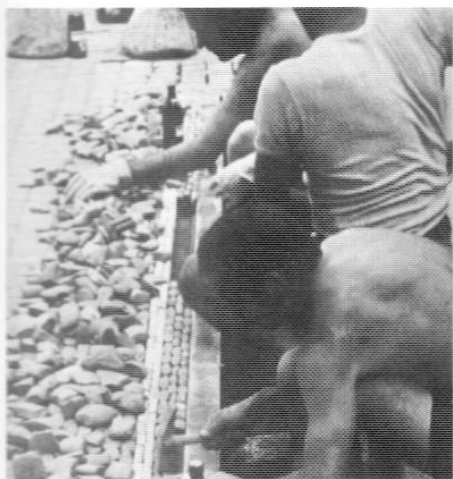


12. Otra evolución de las técnicas de moldeado apunta hacia el incremento de tamaño del molde. El más espectacular es el *encofrado túnel*, conjunto de moldes metálicos que forman grandes cajones invertidos, sobre y entre los cuales se vierte el hormigón.

13. En el Hotel Juan Carlos I de Barcelona, de C. Ferrater, el hormigón moldeado por un encofrado trepador se dignificó para conformar la fachada principal del edificio.



14. Los pequeños elementos se *adicionan* para formar elementos constructivos de mayor tamaño. La técnica más tradicional es la albañilería. La tradición artesana en el uso de pequeños elementos es vastísima. Estos alarifes tunecinos están construyendo una cáscara elíptica gracias al cordel atado a la muñeca, que les garantiza que, cuando lo tensan estirando el brazo, dibujan un círculo inclinado.



15. Los pequeños elementos también se colocan sobre soportes superficiales en técnicas de alicatado, de chapado o de solado, como en esta cuidadosa pavimentación de una plaza alemana.

Técnicas de puesta en obra de los materiales conformados

Las técnicas de puesta en obra de los materiales amorfos están condicionadas, como veremos, por los cuidados que exige la adecuación de su aplicación al cambio de la plasticidad. En efecto, el material se endurece, fragua, pierde progresivamente plasticidad y se va volviendo más consistente y por lo tanto menos moldeable. A partir de ese momento el proceso de puesta en obra está absolutamente minutado. Todas las ventajas del fácil monolitismo de la construcción con materiales amorfos se sitúan en el otro platillo de la balanza respecto a estos especiales cuidados que exige la puesta en obra.

Por el contrario, todos los materiales conformados, sean de pequeñas piezas, semiproductos cortados a pie de obra o componentes, son fáciles de manipular, pero deben incorporarse al edificio formando con él un conjunto solidario. Esta solidaridad será aquí la dificultad fundamental.

Para establecer una clasificación lógica de las técnicas de puesta en obra, distinguiremos dos niveles de incorporación diferente: si la solidaridad del material incorporado con el resto de las piezas es total, dando lugar su suma a un conjunto de nuevas características en el que cada pieza pierde su individualidad, hablaremos de técnicas de *adición*; si la solidaridad se ve reducida a unos contactos más o menos puntuales, pero en los que cada elemento conserva sus propias características, hablaremos de técnicas de *fijación*.

La *adición* reúne el conjunto de técnicas más características de la construcción, entre ellas, la albañilería y la carpintería. Es evidente que para conseguir el monolitismo y la perfección formal de un muro o de una bóveda por *adición* de piezas tan pequeñas como el ladrillo es necesario el más alto nivel de saber artesano (fig. 14).

Las *fijaciones* forman un amplísimo campo de recursos técnicos en rápida expansión dentro de la construcción contemporánea. A los clásicos clavados y atornillados se ha sumado hoy una larguísima lista de formas de fijación que conforman el soporte técnico de la más moderna arquitectura.

Si bien la característica fundamental que diferencia la *adición* de la *fijación* es la pérdida de la individualidad de cada pieza, en el caso de la primera también puede añadirse otro caracterizador, que suele aparecer, aunque no de manera definitoria: la más o menos clara reversibilidad de todas las técnicas de fijación. Los elementos *fijados* (clavados, atornillados, etc.) pueden desligarse sin peligro para su integridad física, mientras que recuperar las rasillas de una bóveda catalana resulta prácticamente imposible.

La *adición* mediante aglomerantes hidráulicos

En general, las técnicas de *adición* tradicionales, y hoy todavía en uso, basan la *adición* en la interposición de aglomerantes hidráulicos. La retracción, los problemas de transmisión de cargas que veremos más adelante y la desaparición del conocimiento obrero reducen, hoy, cada vez más, el campo de aplicación de la *adición* de los pequeños elementos.

Siguiendo el esquema aplicado a las técnicas de los materiales amorfos, distinguiremos aquí también los tratamientos de revestimiento superficial de las técnicas que permiten formar elementos autoportantes de mayor volumen. Los revestimientos tradicionales colocados por adición son plaquetas, alicatados, mosaicos etc. (fig. 15). Hasta hace pocos años se recurría a esta técnica para colocar piezas de mayor superficie, como la piedra artificial o natural en las fachadas, pero la prudencia frente a los desprendimientos por tensiones térmicas o de retracción y la citada reducción de la habilidad artesana han llevado a su sustitución por técnicas de fijación de comportamiento más claro y seguro.

La adición con otros tipos de materiales de unión

La rápida evolución de los materiales y la escasez de artesanos están introduciendo técnicas de adición, como el encolado, basadas en nuevos tipos de colas, como las resinas epoxídicas, y dando lugar a nuevos materiales, como la madera laminada y encolada, que aquí no podremos más que apuntar.

Por otra parte, los materiales metálicos se unen solidariamente mediante sistemas de soldadura que forman un conjunto específico dentro de las técnicas de adición. Soldaduras de tipos diversos son también las técnicas de unión de materiales asfálticos, pvc, etc.

La fijación

La pérdida del saber obrero, que desplaza al artesano de la construcción, y la exigencia de la sociedad contemporánea, que introduce las técnicas que pueden ser rápidamente aprendidas, se suman a la progresiva heterogeneidad de los materiales para substituir progresivamente la adición por la fijación. Los clavos, tacos de expansión, tornillos, disparos, colgados e *inserts* forman un conjunto de técnicas cada vez más introducidas en la obra, que implican el uso de máquinas-herramienta cada vez más sofisticadas y que se aplican fundamentalmente a los paneles conformados y, en particular, a los semiproductos. Es el caso del fibrocemento, el cartón-yeso, las chapas metálicas, etc., aunque esta situación no es exclusivamente moderna: bien tradicional es el clavado de la pizarra.

Recordemos que las dos características principales que distinguían la fijación de la adición eran la conservación de la individualidad de cada pieza y la reversibilidad, más o menos clara, de todas las técnicas de fijación (fig. 16). Añadiremos ahora una tercera característica, específica de las fijaciones, que raramente se encuentra en la adición: la posibilidad de permitir ciertos movimientos relativos entre los materiales fijados. Desarrollaremos este punto con más detalle en el capítulo dedicado específicamente a la fijación (fig. 17).

Aspectos fundamentales de las técnicas de ejecución

Los próximos capítulos recorrerán la técnicas más importantes de la construcción, las agruparán en sus tipos más característicos e intentarán determinar los aspectos de su aplicación en obra que sean más determinantes para cada una de ellas. En efecto, los puntos que han de ser cuidados en un molde dependerán probablemente del proceso de fraguado, mientras que en la albañilería parece que será la trabazón el objetivo más importante de los cuidados en la ejecución.



16. La fijación por tornillería, como la de esta escuela californiana, o por cualquier otra de sus múltiples formas, es la gran alternativa contemporánea a las técnicas de adición. Se trata, en general, de procesos reversibles en los que cada componente conserva cierta individualidad dentro del nuevo elemento constructivo.



17. La sutil estructura metálica de las cajas de vidrio en las torres de ascensores del Centro de Arte Reina Sofía de Madrid, de I. Ritchie. Las sofisticadas fijaciones y rótulas, con sus brazos de palanca de acero inoxidable, permiten que el vidrio se mueva solidariamente siguiendo toda su caja los movimientos de la torre metálica interior. Uno de los dos redondos de acero cuelga de la parte superior de la estructura; el otro, el exterior, se ancla en el cimiento. Los vidrios colgados del otro extremo de la palanca siguen, reducidos, los movimientos de la estructura. Todo el edificio se mueve gracias a las modernas técnicas de montaje.

La validez del criterio de selección de las exigencias que habrá que controlar se confirmará con el recurso a la bibliografía histórica de la tecnología de la construcción.

Por fin, cada grupo de técnicas se ejemplificará con la descripción precisa del proceso de ejecución y control de la técnica más representativa de cada grupo. Así, el moldeo se ejemplificará con la puesta en obra del hormigón; el tendido, con la aplicación de morteros de cemento; la albañilería, con la fábrica de ladrillo, etc.

Para ordenar el recorrido de las exigencias o cuidados que se deben llevar a cabo en cada técnica, supondremos que pueden ser clasificadas en tres grupos determinados generalizables a todas las técnicas. Unas exigencias dependerán de las **características del material**, es decir, de su composición o su forma al llegar a la obra. Las primeras cuidarán de que su composición sea la deseada; las segundas intentarán conseguir que el comportamiento de la construcción sea solidario, sea cual sea la forma del material.

Otras exigencias dependerán de las características del **proceso de puesta en obra**, y garantizarán que este proceso puede realizarse correctamente o que su evolución no perjudica los materiales implicados.

Por fin, el tercero y último grupo de exigencias dependerá de las características del **elemento constructivo** en proceso de ejecución, fundamentalmente de la función que éste deba cumplir en el edificio o de la solidaridad que deba asegurar en su comportamiento con otros elementos constructivos.

Con este guión general, iniciaremos el estudio de los principales grupos de técnicas constructivas establecidos en los apartados anteriores.

4. El moldeo

El moldeo es la técnica de conformación de los materiales *formaceos* por endurecimiento de los mismos dentro de un molde (fig. 1). Ese proceso de endurecimiento da lugar a un material cohesivo, sólido, que basa en su continuidad y en esa cohesión entre sus partículas el cumplimiento de la exigencia albertiana del comportamiento solidario.

Ésta es, probablemente, la más antigua de las técnicas constructivas, puesto que la naturaleza brinda un material, la arcilla, cuya plasticidad cambia según su contenido de agua: pasa de ser una pasta fácilmente moldeable a convertirse en un duro terrón.

4.1 La plasticidad

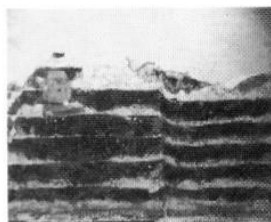
Para que ese cambio pueda utilizarse al servicio de la técnica constructiva es necesario controlar dos aspectos fundamentales: la calidad de la arcilla y la velocidad del cambio de plasticidad.



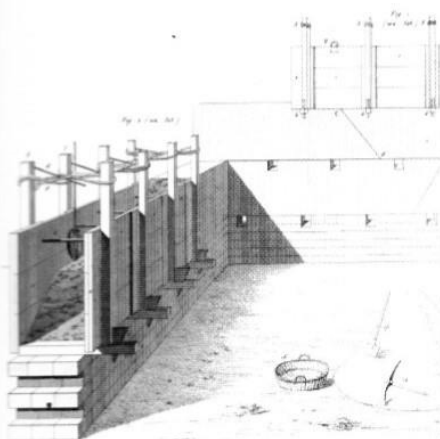
1. Las clásicas fachadas de fundición de Nueva York recuerdan la ductilidad formal de los materiales moldeables. Obsérvese la delgada capa de fundición que forma el moldurado de esa base.



2. La plasticidad del material guía todo el proceso de puesta en obra. El transporte de arcilla en las manos de estos constructores africanos, por ejemplo, exige a la masa una gran consistencia.



3. Este curioso tapial del Convent dels Angels, en Barcelona, muestra una verdagada de cal cada 15 o 20 cm.



4. El tapial es un sistema ancestral de moldeado. Esta lámina del *Art de bâtir* de Rondelet recoge y expone todo el proceso de este tipo de construcción, común a todos los países con buenas arcillas.

La importancia del primer aspecto es manifiesta: una arcilla especialmente granujosa, por ejemplo, no producirá el material cohesivo que deseamos. Los textos clásicos abundan en la referencia a los criterios de selección de las tierras: "La tierra que debe emplearse para construir tapias o paredes debe ser arcillosa, pegajosa, compacta, limpia de guijo y con poca mezcla de arena y cascajo", escribía Juan de Villanueva ¹.

Pero Serrallach, siempre más práctico, da la clave para un fácil y directo control: "Se conocerá que la arcilla es buena si al arrancarla sale en forma de terrones y si al cortar un terreno se conservan las tierras en el corte por bastante tiempo en la posición vertical; también se conocerá si es buena si al coger con la mano un puñado y apretando la mano, luego al abrirla conserva la forma de la mano" ².

Recordaremos después estos precedentes sobre la difícil calidad de la materia prima para el moldeado, puesto que, además, esa plasticidad debe evolucionar de modo que permita la puesta en obra que se haya previsto. El transporte de pellas de arcilla con la mano, que todavía se hace en algunos pueblos africanos, exige un alto grado de consistencia y dificulta el moldeado (fig. 2). Por el contrario, una arcilla muy fluida puede ser fácil de moldear, pero exigirá un largo tiempo de moldeado y quizá presente excesivas retracciones.

4.2 La cohesión

Pero el objetivo principal de esta técnica de conformación es que el material moldeado alcance la necesaria cohesión, es decir, cierta difusa resistencia a las tracciones lo más anisótropa posible. El tapial formará así una estructura concrecionada, de características mecánicas isotropas, como defendía Cardellach. En la tapia real, eso se consigue añadiendo cal como aglomerante (fig. 3) y, en muchos casos, armando la arcilla con cortos fragmentos de paja.

El apisonado de arcilla en un encajonado molde de madera apoyado en la tapia inferior y sujeto por un encordado tensable por arriba llegó a ser perfeccionada como técnica constructiva absolutamente racionalizada y mereció su publicación en el *Art de bâtir* de Rondelet (fig. 4).

La conformación de la arcilla es de antiquísima tradición en España y es posible que de aquí la aprendieran los romanos ³, quienes llevaron la técnica de moldeado a su máxima perfección. En sus obras más antiguas, se encuentran tapias con adición de guijo de diversos tamaños, como se hacía ya en Oriente, aunque en el siglo III a.C. empezaron a substituir la arcilla por cal ⁴. Bajo Sila, Roma construye, con hormigón de cal, bóvedas de 10 m de luz, como las que cubren el Tabularium.

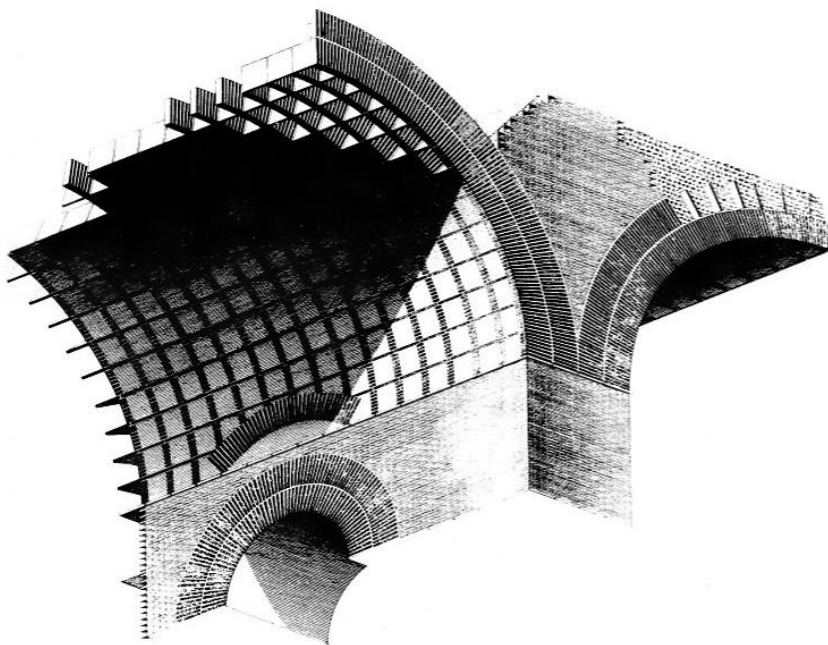
Pero es con Julio César cuando se puede empezar a hablar de auténticos hormigones porque es cuando se difunde, aunque al parecer sin conocer muy bien sus posibilidades, un material maravilloso: la *puzzolana*. El teatro de Pompeyo, del año 55 a.C., muestra ya un magnífico hormigón de limpias arenas y áridos de

distintos tamaños, en el que la presencia de la *puzzolana*, "que por su propiedad química de ser atacada por la cal grasa, única conocida entonces, formaba con ella el material cuya hidráulica y resistencia ha dado universal fama de solidez a las construcciones de Roma" ⁵.

4.3 Moldes o encofrados

Pero el uso cada vez más atrevido de este material tropieza con limitaciones evidentes. Esta técnica de puesta en obra exige un contenedor, un molde, que se convierte en una construcción que, aunque provisional, puede llegar a adquirir el mismo grado de complejidad que una estructura definitiva. Quizá por ello sus primeras funciones se limitaron a zócalos, rellenos y cimentaciones, donde su presión hidrostática estaba contenida por las tierras o por gruesas hojas de sillaría.

Según Choisy, la compacidad de la mezcla, tan necesaria para su cohesión, se conseguía gracias al golpeteo con piones de una mezcla de pasta y áridos hecha *in situ* ⁶. Cuando su uso se extrapola a situaciones tan arriesgadas como las bóvedas del Tabularium, debió ser necesario elaborar solidísimos encofrados, cimbras, capaces de soportar tanto peso y tanto golpeteo.



5. El moldeado romano se basaba, según Choisy, en la colocación orientada de capas de piedras sobre las que se vertía una lechada de *puzzolana*. Así se evitaban los grandes empujes del vertido de hormigón.



6. La imaginación de Jujol, frecuentemente puesta al servicio de la escasez de recursos, ofrece este ejemplo de armaduras insólitas para el hormigón: un viejo somier sirve de armado y encofrado a una solera de hormigón en el acceso a la iglesia de Montferri.

En obras posteriores, a partir de Augusto, el hormigón romano cambia radicalmente de estructura. Los áridos son de mayores dimensiones y se orientan formando capas horizontales ⁷. La moderna arqueología da así la razón a Choisy que, en una generalización excesivamente radical, considera que todas las obras de superestructura donde el hormigón no es vertido entre muros de sillería no son auténticas obras de hormigón, sino mamposterías formadas por hiladas sobre las que se vierte el mortero (fig. 5). Choisy justifica esta construcción por la menor presión hidrostática de esa mampostería orientada y porque, además, hace innecesario el apisonado ⁸. De este modo es posible ahorrar gran parte de un encofrado, que es uno de los componentes fundamentales en el coste de esta técnica de puesta en obra. La mentalidad economicista de los constructores romanos justifica una evolución que, como veremos, es paralela a la que están sufriendo los encofrados actualmente.

4.4 El hormigón: material compuesto

El hormigón romano, además de pasar de la arcilla a la cal y de incorporar la *puzzolana*, introdujo toda clase de materiales para optimizar su eficacia. Materiales de derribo por razones de economía, áridos ligeros por razones de peso, incluso vasijas o piezas especialmente diseñadas, fueron utilizadas para aligerar la bóveda romana ⁹.

Esta variada combinación de sus componentes sigue siendo una de sus características después de quince siglos de olvido. El hormigón contemporáneo continúa mostrando esa capacidad de adecuación que le califica como un conjunto de materiales cuya única raíz común es la presencia de un aglomerante y un aglomerado. A ellos se añade, en el hormigón armado, algún material específicamente capacitado para soportar las tracciones ante las que era tan frágil. El aglomerante suele ser un cemento de los permitidos por la norma ¹⁰; no obstante, esta lista no puede considerarse cerrada.

El aglomerado suele ser un árido silíceo, pero, a la amplia gama de posibles granulometrías y orígenes, tendremos que añadir las ya no tan nuevas posibilidades de los áridos ligeros naturales o artificiales, como los de origen volcánico, los esquistos, las escorias y las arcillas expandidas.

La armadura habitual es la de acero, sean barras lisas, corrugadas o mallas electrosoldadas, pero se está difundiendo rápidamente el hormigón armado con fibra de vidrio, que resiste el ataque de los álcalis del hormigón, y también se han realizado con éxito ensayos de hormigones armados con fibras de acero y de polipropileno, que proporcionan una resistencia sorprendente (fig. 6).

Si recordamos, además, la amplia gama de aditivos que el hormigón admite, tendremos que aceptar que, bajo la palabra hormigón armado, puede esconderse una variada gama de materiales.

Incluso en su versión más habitual y restringida, es evidente que las características del hormigón varían radicalmente en función, simplemente, de la granulometría y la composición del material. Por ello, debemos recordar que el hormigón es un

material diseñado a medida para cada obra e incluso para cada elemento constructivo dentro de la obra.

4.5 Exigencias de la puesta en obra del hormigón

Hoy, como ayer, el moldeado como técnica de puesta en obra del hormigón plantea unas exigencias críticas, unos cuidados específicos, alrededor de los cuales giran todos los controles que deben hacerse en la obra.

Como ya señalábamos, esas exigencias pueden agruparse como dependientes de tres aspectos:

I. Exigencias planteadas por las características del material

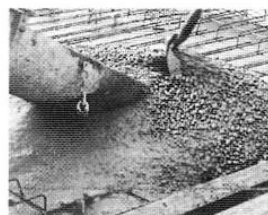
El hormigón es, por definición, un material compuesto, y la garantía de que ese compuesto es exactamente el deseado debe establecerse lo más exhaustivamente posible. Por ello se comprueban en la recepción, directamente, las características físicas, fundamentalmente resistencia y consistencia, pero también debe asegurarse previamente que la composición u otras características descritas en el proyecto son las expresadas en la factura de entrega. No sólo será necesario que el material globalmente tenga la composición idónea, sino que, además, esa composición debe ser homogénea en toda la masa del material. Es decir, es necesario evitar cualquier tipo de segregación que modifique la granulometría en alguna zona del material, las pérdidas de lechada, etc. (fig. 7).

La primera exigencia fundamental que debe satisfacer un proceso de moldeado es, pues, **que el hormigón tenga la composición y las características deseadas en todos los momentos del proceso y en cada punto de su masa** (Exigencia I).

Por otra parte, este material amorfo consigue su comportamiento solidario por la cohesión que existe entre sus componentes, y esa cohesión depende, como señala Cardellach, de la presión que se ejerza entre sus partes durante el fraguado¹¹. La presencia de burbujas de aire dará lugar a un material frágil, y deben evitarse aplicando métodos de apisonado o, más modernamente, de vibrado (fig. 8 y 9). Pero el objetivo, en cualquier caso y como en todas las técnicas de unión, es aproximar, comprimir en lo posible y, en fin, **compactar las partes y partículas de la masa durante el fraguado** (Exigencia II).

II. Exigencias que dependen del proceso de puesta en obra

El moldeado se basa en la transformación de un material, de amorfo a conformado. La puesta en obra supone una serie de manipulaciones a lo largo de las cuales el material va cambiando su plasticidad. Según sean estas manipulaciones, la plasticidad será una u otra: el transporte de la arcilla en las manos del niño africano o el bombeo a gran altura del hormigón moderno. Pero, en cualquier caso, ambos procesos, el de la puesta en obra y el del cambio de la plasticidad, deben adecuarse. Si la arcilla está todavía demasiado líquida, se escapará entre los dedos del niño; si el hormigón está ya demasiado seco, embozará el conducto de bombeo. Es necesaria, pues, **la adecuación de la puesta en obra a la velocidad del cambio de la plasticidad** (Exigencia III).



7. Uno de los puntos críticos de la puesta en obra del hormigón es la segregación de sus componentes por mal transporte, vertido o vibrado. En la figura se aprecia la falta de lechada delante de la canatela y su exceso detrás.



8. El total macizado del volumen que ha de ser moldeado se asegura con tratamiento de compactación. El más habitual es el vibrado.



9. La eficacia del vibrado puede apreciarse en esta figura. Se formó en un cajón una capa de árido ligero y sobre ella se vertió una lechada de cemento. El macizo se separó en dos partes por una chapa de madera y se vibró el lado derecho. En este lado el cemento llegó al fondo del cajón y formó un dado compacto. En el izquierdo, la lechada sólo penetró unos centímetros.

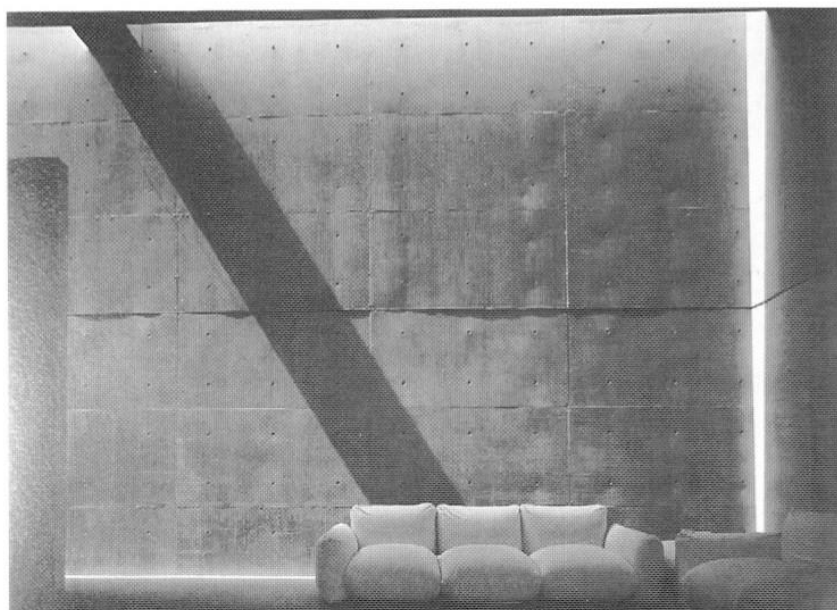


10. El convento de La Tourette ejemplifica el uso brutalista del hormigón con la textura que ofrece el más simple de los encofrados: el tablero de tablas de madera. Cada disposición de tablero y nuevo vertido supone una presión hidrostática que deforma el tablero y permite la pérdida de lechada. Esa pérdida mancha el elemento inferior y deja a la vista el árido del elemento superior.

La normativa es muy explícita a este respecto: "se utilizarán procedimientos adecuados para conseguir que las masas lleguen al lugar de entrega en las condiciones estipuladas sin experimentar variación sensible en las características que poseían recién amasadas" ¹². Pero esta exigencia se extiende también, como veremos, al resto del proceso de puesta en obra, más allá del estricto transporte y vertido. Afecta a las condiciones del curado y desencofrado, que deben adecuarse con precisión a las cambiantes características físicas del hormigón en cada momento.

III. Exigencias que dependen del elemento constructivo que ha de ser elaborado

Algunas de estas exigencias son comunes a todo tipo de elementos constructivos. Así, el **que la forma del elemento sea exactamente la definida en el proyecto** (Exigencia IV) es una exigencia que implica un control especial del encofrado, sus dimensiones y su colocación. Sin embargo, determinadas funciones del elemento constructivo final pueden dar lugar a nuevas exigencias específicas. Así, a todos los elementos vistos se les exigirá siempre planeidad y, en algunos casos, cierto control de textura. (fig. 10 y 11). Por el contrario, en los elementos estructurales verticales será fundamental una perfecta verticalidad para garantizar el correcto descenso de las cargas. La imposibilidad de controlar la exacta forma y textura de la pieza que se está conformando dentro del encofrado es una de las características más negativas del moldeado. Coqueras, lavados, errores en las reservas para paso de instalaciones, desplazamiento de los berenjenos, etc., sólo se manifiestan al desencofrar. La posibilidad de que hayan quedado



11. Tadao Ando busca el resultado opuesto. La estanqueidad de las juntas y la potencia de la estructura de soporte del encofrado le permiten un hormigón de tersa textura que caracteriza su arquitectura.

vacíos en el moldeo es el mayor problema de los encofrados perdidos, ya que, al no poder comprobarse el macizo, se crea una grave desconfianza en los elementos portantes (fig. 12).

Para satisfacer estas cuatro exigencias fundamentales serán necesarios ciertos cuidados y controles en todo el proceso de moldeo, que revisaremos rápidamente, en el apartado siguiente, para el caso del hormigón.



12. Sólo un intenso vibrado y una granulometría estudiadísima pueden hacer posible la precisión de este moldeo sobre el encofrado esculpido por Subirachs para el edificio Telexprés de Barcelona (Esquius y Puig).