

Agradezco la colaboración de E. Manino por la redacción de los anexos en los capítulos VII y VIII, y de A. Casals por la redacción del anexo en el capítulo IX. También la de Pilar Cárceles porque me ha ayudado a realizar y me ha dado soporte en el trabajo de cada día.

I. Paricio

Esta publicación es una revisión y adaptación de un trabajo anterior del ITEC publicado en catalán por primera vez en octubre de 1983 con el título:
La Construcció de l'Arquitectura 1. Les Tècniques.

LA CONSTRUCCIÓN DE LA ARQUITECTURA

1. Las técnicas

2ª. edición revisada

Ignacio Paricio Ansuategui



INSTITUT DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCIÓ DE CATALUNYA



INSTITUT DE TECNOLOGIA
DE LA CONSTRUCCIÓ DE CATALUNYA

Composición del Patronato

Presidente

Albert Serratosa i Palet

Entidades Miembros (representadas por su titular) 15 Departamentos de la Generalitat de Catalunya

Política Territorial y Obras Públicas

Enseñanza

Industria y Energía

CIRIT

Colegios profesionales

Arquitectos

Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Ingenieros Industriales

Aparejadores

Ingenieros Técnicos Industriales

Ingenieros Técnicos de Obras Públicas

Organizaciones empresariales

Escuelas T. S. de Arquitectura

Escuela T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Escuela T. S. de Ingenieros Industriales

Escuela U. de Arquitectura Técnica

Miembros a título individual

Ferran Espiau i Seoane

Diseño Claret Serrahima

© Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya. ITEC

Primera edición: Octubre 1985. 1000 ejemplares. ISBN: 84-85954-21-1

Segunda edición: Octubre 1988. 1000 ejemplares. ISBN: 84-85961-32-3

Impreso en I.G. Galileo

Dep. Legal: B-41810-1988

ÍNDICE

<i>Prólogo</i>	9
<i>Introducción. Construcción y arquitectura</i>	
Planteamiento clásico de las relaciones entre la construcción y la arquitectura	11
La construcción, soporte físico de la arquitectura	13
<i>Primera parte. Los movimientos de la construcción</i>	
<i>La esencia de la construcción</i>	17
El edificio vivo	17
<i>Capítulo 1</i>	
<i>Los movimientos de origen mecánico</i>	
La ley de Hooke y la construcción	19
La indisoluble relación tensión-deformación	20
Movimientos diferenciales debidos a diferencias de tensión	21
Movimientos diferenciales debidos a diferencias de módulo de elasticidad	22
La inversión del proceso. De las deformaciones a las tensiones	24
La ley de la prioridad en el descenso de cargas	24
<i>Capítulo II</i>	
<i>Los movimientos térmicos</i>	
Los movimientos de origen térmico	27
El módulo de deformación térmica lineal	28
Las variaciones de temperatura	28
Cuantificación de los movimientos térmicos	29
Los movimientos diferenciales	29
Las dos posturas en el modo de enfrentarse a los movimientos	30
La importancia de construir en primavera o en otoño	32
<i>Capítulo III</i>	
<i>Movimientos provocados por cambios de humedad</i>	
Breve historia de un muro	33
El "emplecton" clásico	34
El muro medieval	35
Cuantificación de los movimientos provocados por cambios de humedad	40
Conclusión	42
<i>Segunda parte. Las técnicas de puesta en obra</i>	
<i>Capítulo IV</i>	
<i>Las técnicas de la construcción y la forma de los materiales</i>	
Clasificación de los materiales de construcción por su forma	45
La forma de los materiales	46
El tamaño de los materiales	46
La conformabilidad	47
Las técnicas de transformación y la forma de los materiales	49
Aspectos fundamentales de las técnicas de ejecución	52
<i>Capítulo V</i>	
<i>El moldeo</i>	
La plasticidad	53
La cohesión	54
Moldes o encofrados	54
El hormigón: material compuesto	55
Exigencias de la puesta en obra del hormigón	55
<i>Capítulo VI</i>	
<i>El tendido</i>	
La estructura del tendido	59

La cohesión	60
La plasticidad	61
El acabado	61
La adherencia	62
Las palabras y las técnicas	62
Conclusión	64

Capítulo VII

La albañilería

Exigencias que dependen del tipo de material	69
La trabazón	70
La exigencia de trabazón en la construcción tradicional	71
Los problemas de trabazón de Brunelleschi	71
La cohesión	72
Exigencias que dependen del proceso de puesta en obra	73
Exigencias que dependen de las características del elemento constructivo a realizar	74
El comportamiento solidario	74
Conclusiones	75

Capítulo VIII

La adición de grandes conformados

Exigencias que dependen de la forma del material	77
Exigencias que dependen del proceso de puesta en obra	79
La cantería griega	84
Exigencias que dependen del elemento constructivo a realizar	85

Capítulo IX

La fijación

El problema de las tracciones	89
La libertad de los movimientos	90
Aspectos definitorios de las fijaciones	92
El clavado	93
El atornillado	93
Los tacos mecánicos	94
Los tacos químicos	94
Las inserciones	95
Exigencias que dependen de la forma del material	95
Exigencias que dependen del elemento constructivo a realizar	96

Tercera parte

Capítulo X

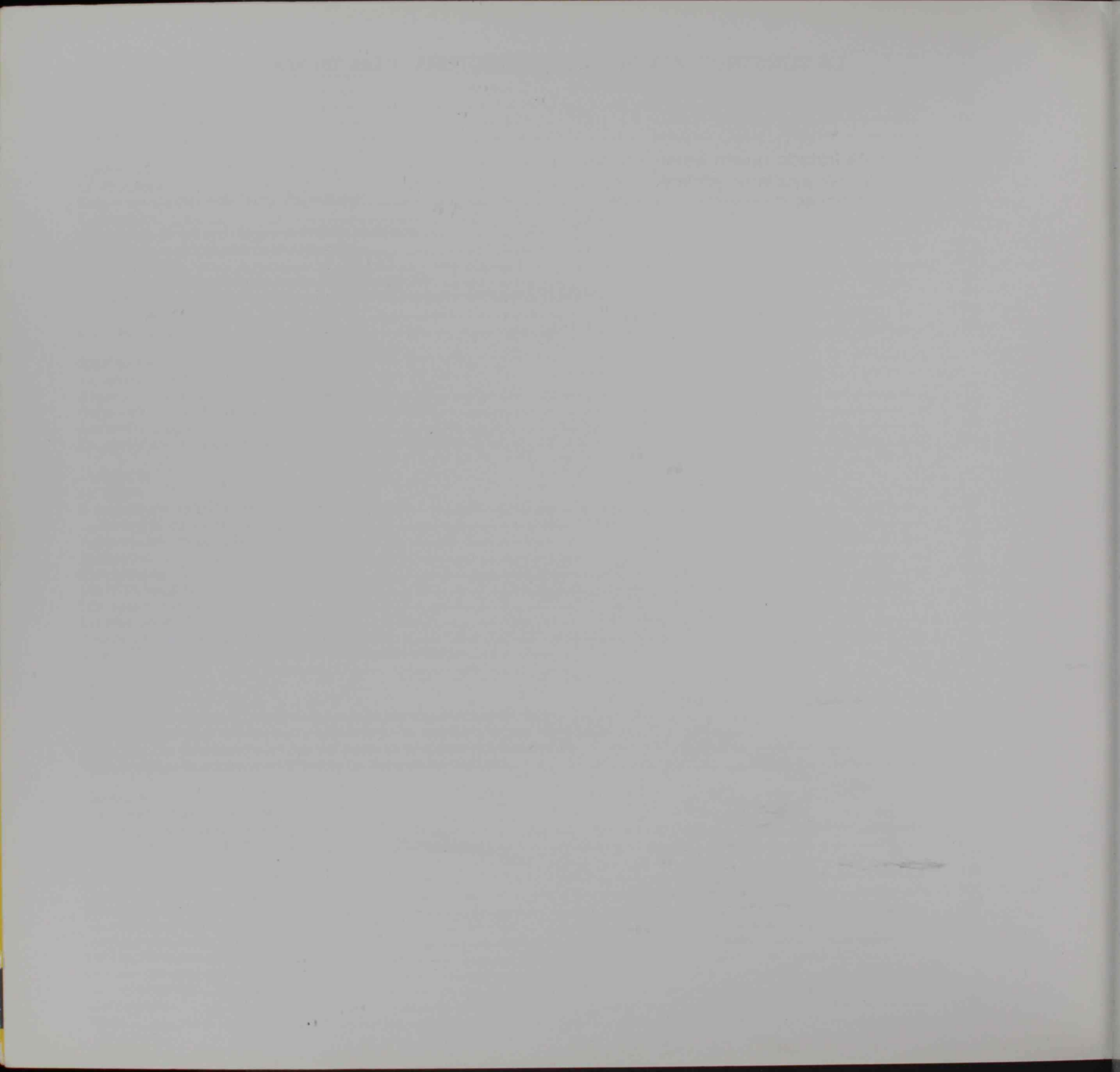
Resumen de las exigencias fundamentales de las técnicas de puesta en obra	101
Exigencias que hacen referencia al funcionamiento del material que garantiza la unión	104
Exigencias que garantizan que el proceso puede llevarse a cabo correctamente	104
Exigencias que dependen de la forma final del elemento constructivo	104

Capítulo XI

Constructivizar la construcción

El fracaso de la industrialización	115
Las leyes de la evolución tecnológica	115
La división del trabajo	107
El incremento de la inversión fija	107
La construcción hoy	107
Vectores de la evolución tecnológica	108
Las tendencias de la evolución	109
Los materiales amorfos	110
Los pequeños elementos	112
Los materiales naturales y los semiproductos	113
Los componentes	114
Conclusiones	115
Notas	116

LA CONSTRUCCIÓN DE LA ARQUITECTURA. 1 Las Técnicas



Prólogo

Es evidente que este tratado quiere llenar el vacío que hay en la bibliografía sobre la construcción en nuestro país, y a la vez ayudar a esclarecer muchos conceptos que han ido entrando en el terreno del confucionismo a través de versiones y traducciones poco acertadas.

El estado actual de la construcción en Catalunya ha resultado ser simplemente la consecuencia de una evolución excesivamente rápida de los caminos tradicionales, provocada por un crecimiento dominado por cuestiones pragmáticas y no por un planteamiento técnico que tuviera esencialmente en cuenta los medios con que se puede contar y su coste, y no únicamente éste último. Todo esto ha conducido a una degradación de los sistemas y procedimientos constructivos, cuyos resultados, por desgracia, hemos podido comprobar y seguiremos comprobando ampliamente.

Este tratado que ahora comentamos creo que puede y tiene que ayudar mucho a formar una visión general clara de todos los sistemas constructivos, sin abandonar, en ningún modo, los tradicionales, de manera que sirva de base y ayuda para tener criterios claros a la hora de estudiar y juzgar las aplicaciones constructivas concretas que se irán presentando.

Recordar que el edificio tiene que ser firme, útil y bello -el firmitas, utilitas y venustas de Vitrubio- puede parecer innecesario, pero, después de la profunda ruptura producida en distintas épocas entre construcción y arquitectura, era preciso volver a encontrar, para la construcción, el lugar que le corresponde en cada uno de los momentos del proyecto. Es evidente que la construcción es el soporte físico de la arquitectura, pero es necesario reencontrar el equilibrio vitrubiano y evitar, según las épocas, el predominio de una u otra.

Recordar que el edificio se mueve nos llevará a dar la debida importancia a la heterogeneidad de los materiales constructivos y a los movimientos diferenciales.

El análisis de los diferentes movimientos de la construcción y de sus causas nos ha de llevar a comprender mejor el comportamiento de un edificio, cuyas soluciones constructivas puedan adaptarse mejor a estas circunstancias.

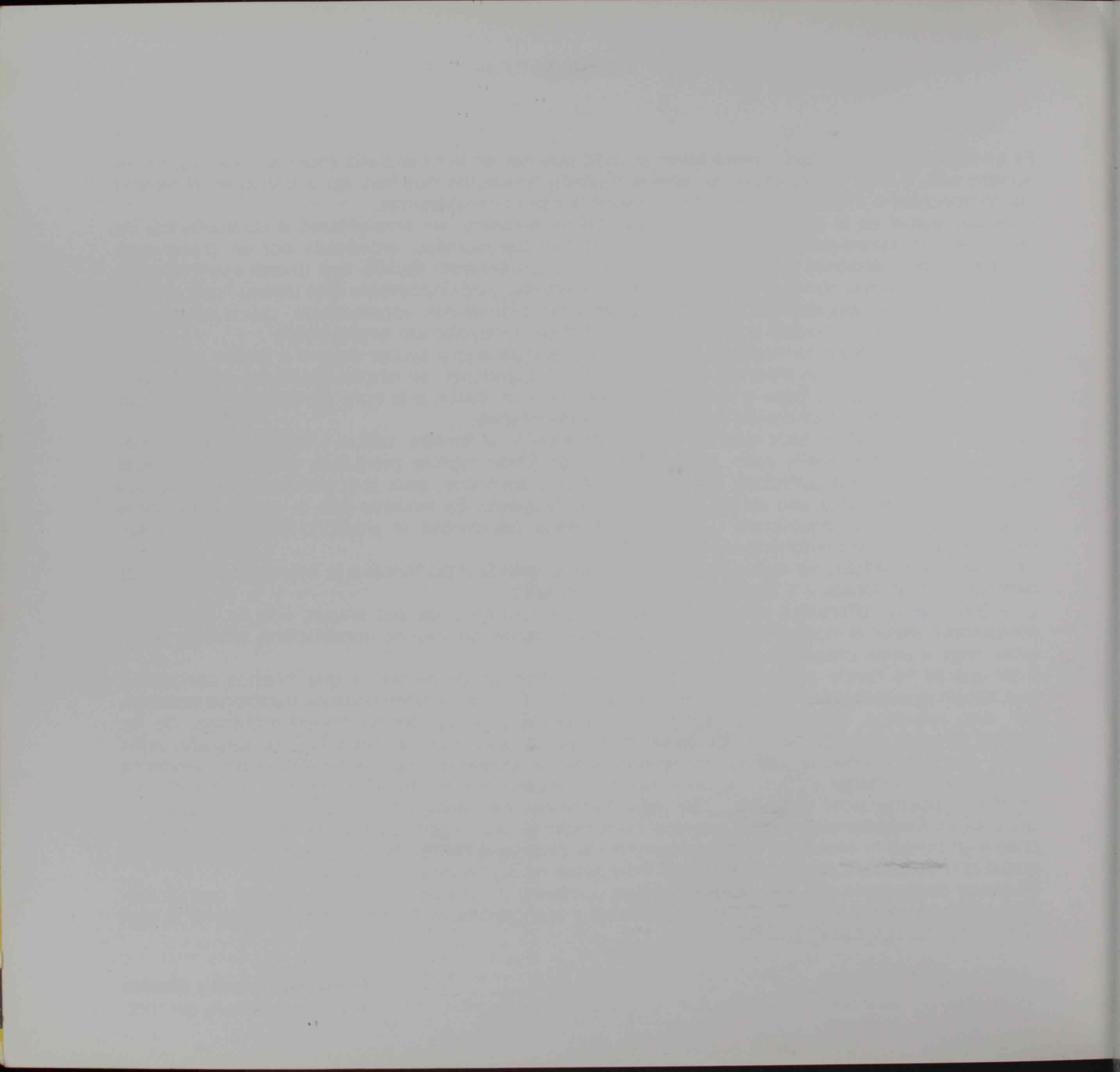
Creo que se ha hecho un especial hincapié en las técnicas de tendido y que muchos conceptos, que habían quedado muy oscuros después de las N.T.E. y de la nomenclatura tradicional catalana, han sido resueltos. Hay que agradecer la incorporación, en los temas correspondientes, de los puntos de vista que figuran en los apuntes de los profesores L.Serrallach y J.Bassegoda, entre otros, que pueden ayudar, de forma extraordinaria, a revitalizar unas técnicas que hoy tienden a deformarse u olvidarse a causa de unos nuevos procesos constructivos que se han actualizado sin criterios suficientemente objetivos y que están fundados esencialmente en razones económicas.

Unas ideas fundamentales sobre grandes conformados, las exigencias básicas de las técnicas de puesta en obra y la evolución de las formas de los materiales cubren la última parte del tratado, que acaba con un análisis de las perspectivas inmediatas de las técnicas de construcción.

Mi mayor deseo sería que este tratado fuera el comienzo de una larga serie de estudios que profundizaran en campos poco estudiados o trabajados y que contribuyeran a esclarecer y a elevar el nivel técnico de nuestra construcción.

Francesc Bassó y Birulés

noviembre de 1983



Planteamiento clásico de las relaciones entre la construcción y la arquitectura

La desvinculación entre la técnica constructiva y el proceso de proyecto arquitectónico se acepta hoy con tanta naturalidad que se hace necesario intentar recuperar, por la vía de la argumentación, la estrecha relación entre técnica y proyecto que ha existido en 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 que 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.

En primer lugar, creando unos límites razonables al proyecto:

hoy, cuando todo parece técnicamente posible, esta condición es 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. Esta aproximación a la construcción, entendida como un límite razonable, no debe tomarse como una castración de la construcción 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 imaginería cada vez más críptica, ensimismada y banal en cuanto a sus referencias materiales, contrasta con la riqueza de la composición que se enriquece con las aportaciones de la tradición o de la lógica constructivas.



1. La fachada lateral de la catedral de Mallorca es 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.

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

Hoy, las exigencias técnicas se superponen al proyecto para darle una mínima viabilidad constructiva, pero no se introducen como un elemento más desde los momentos iniciales, los más definitorios, de la síntesis arquitectónica.

Para mejor comprender lo extraño y aberrante de esta situación actual, será necesario distanciarnos de ella, contemplarla con cierta perspectiva histórica. Efectivamente, 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, del proyecto clásico: el que establecía 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. Para Vitrubio, el edificio debía ser firme, útil y bello. Ninguno de los tres aspectos podía ser considerado independientemente de los otros y sólo en su equilibrada satisfacción estribaba la calidad del trabajo del arquitecto.

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 realizado con unos materiales y unas técnicas (firmitas). Ambas, fundidas y sometidas a la cultura plástica del momento, 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 acaba la composición y dónde comienza la construcción en los contrafuertes de la catedral de Mallorca? (fig.1).

Aunque en una 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 belleza. 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 podía existir. Ninguna belleza puede obtenerse si no son previamente aplicadas y respetadas las reglas de la firmeza y la utilidad" (2).

Frente a la parcialización estética, nace la parcialización tecnológica. La fundación, en Francia, de la "Académie des Sciences" (1671), del "Corps de Génie 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 Bâti" de Rondelet abre la serie y sirve de modelo para 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 alejadas 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, hoy, un éxito tan amplio como peligroso (fig 2).

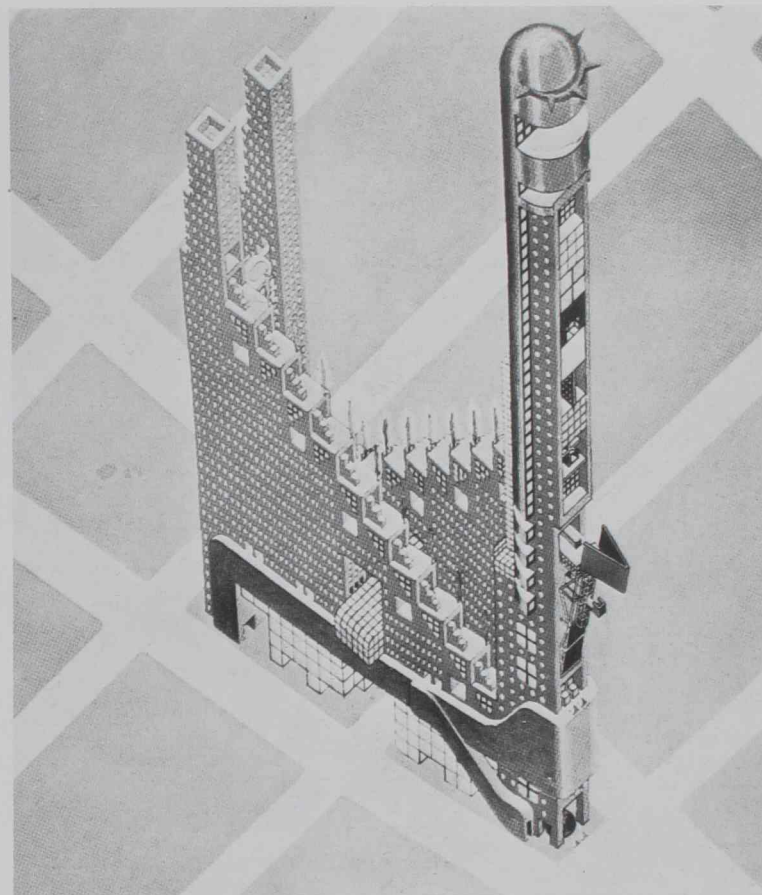
La construcción, soporte físico de la arquitectura

La divergencia histórica que se ha esbozado, esa auténtica y progresiva esquizofrenia, hace constatable el deterioro de la difícil síntesis vitrubiana entre los tres componentes que deben estar siempre presentes en la mente de quien 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, se redactó este libro intentando recorrer los temas fundamentales de la construcción, pero tratándolos siempre desde el punto de vista de su vinculación al proyecto arquitectónico.

¿Cuál es esa construcción que ha de "fundirse, resolverse y disolverse" en la realidad arquitectónica?

Parece útil, para iniciar esta aproximación, retomar los tres componentes de Vitrubio en una de sus últimas expresiones: la que propone Alberti en su "De re aedificatoria" (4). Alberti, más sistemático que Vitrubio, introdujo sutiles cambios para justificar sus operadores como niveles de satisfacción de la naturaleza humana que sólo la Arquitectura, "la más excelsa de las artes", puede satisfacer a la vez. En este planteamiento renacentista, lógicamente más antropocéntrico, la "firmitas" se vuelve "necessitas", que satisface el nivel de las necesidades elementales, básicas, del hombre (y no sólo el de la firmeza de la edificación). La "utilitas" es substituida por la "commoditas",



2. La desvalorización de la componente constructiva en la síntesis arquitectónica se evidencia en la progresiva difusión de la arquitectura dibujada. La potencial expresividad de los materiales y técnicas de la construcción, de la obra, queda absolutamente al margen de esta arquitectura que busca sus recursos en el lápiz y el papel, y hace de esas imágenes el objetivo final del trabajo y del intercambio cultural y comercial.

que resume las cualidades que debe tener un espacio arquitectónico para poder ser utilizado cómodamente. Finalmente, Alberti prefiere el término "voluptas" (placer) como nivel de exigencia humana en lugar de la "venustas" vitrubiana, atendiendo al planteamiento humanístico del sujeto de la satisfacción.

Más allá de planteamientos eruditos y para los objetivos de este texto, la versión propuesta por Alberti nos permite separar la construcción de su esquemática identificación con la "firmitas" y estudiarla como componente de la arquitectura que debe participar en la satisfacción de cada uno de los anteriores niveles de exigencia. Pero, evidentemente, la relación que establece con cada uno de ellos es muy diferente.



3. Para envolver el espacio habitable la arquitectura ha recurrido durante siglos a un solo material en cada edificio: el barro, la madera, la cerámica, la piedra, etc. El derruido castillo de Mota del Marqués muestra, en su sorprendente sección natural, el recurso sistemático a este último material en muros y bóvedas, y es un ejemplo de lo que se puede llamar la construcción homogénea.

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 mismas, los elementos de satisfacción del primer nivel de exigencia: el de la "necessitas" de Alberti. A estos temas dedicaremos este primer volumen de nuestro libro.

Con estas reglas se puede levantar una sólida construcción, pero si la obra ha de albergar un espacio y ha de permitir y proteger el ejercicio de ciertas actividades, aparecerán otras exigencias, la de confort, por ejemplo. La construcción colabora también a la satisfacción de esas exigencias consiguiendo espacios estancos, iluminados, etc. Pero entre las exigencias de la "commoditas" 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 por 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 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 formen el vocabulario constructivo.

Pero ese edificio construido se incorpora al sistema de signos cuyo código de calidad y normas de la belleza define cada cultura. Es el nivel cuya satisfacción corresponde a las exigencias de "voluptas" de Alberti. 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 y que intentará satisfacer el tercer nivel de exigencia. A las relaciones entre construcción y composición arquitectónica se dedicará el tercer volumen de este texto.

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

Primera parte

Los movimientos de la construcción



Este texto se dedicará a analizar las exigencias que la construcción plantea como propias, las que corresponderían al primer nivel de la tríada: la "firmitas" vitrubiana.

Construir, conformar un agregado de materiales, plantea unas exigencias técnicas específicas que serán las mismas tanto si ese volumen es una escultura como si es un puente o un edificio. El problema a resolver es que esa construcción sea posible y perdurable. La durabilidad de la agregación de piezas y materiales se convierte en el objetivo fundamental de esas exigencias.

Alberti, hace ya cuatrocientos años, expresó con vehemencia ese objetivo. La versión castellana de su obra "De re aedificatoria" de 1582 dice: "Toda la razón de ser del edificar está y fenece en esta sola cosa, que juntas y en orden muchas cosas y compuestas con arte, ora sean piedras cuadradas o mampostería, o madera, o cualquiera otra cosa, la composición de ellas se lleve a cabo maciza y cuando se pudiera entera y unida" (1). Alberti considera, pues, que la dificultad fundamental del construir, su esencia, es lo que hoy llamaríamos el comportamiento solidario de los materiales y elementos constructivos. La importancia de esa solidaridad en el tiempo ha estado presente en la mente de todos los tratadistas, independientemente del lado en que se encuentren respecto a la ruptura que se produjo en el siglo XVII entre constructores y académicos. Durand, en su "Précis de Leçons d'Architecture" (2), nos dice que "el edificio sólo será sólido si existe entre sus partes la unión más íntima, horizontal y verticalmente". El descuido de ese objetivo es criticado por muchos, como Patt (3), que arremete contra una construcción en la que "todo está continuamente roto, interrumpido, no hay nada que esté trabado ni ningún enlace entre la mayor parte de sus muros".

Pero Alberti, en el texto citado, no sólo nos señala lo que con él podemos calificar de "esencia" de la construcción, sino que además identifica el obstáculo que tanto dificulta el comportamiento solidario. En efecto, según él, para que unas "partes no estén cortadas ni separadas de las otras" es necesario que estén "compuestas con arte", no meramente yuxtapuestas "porque no es menester (como piensan los no

ejercitados) poner una piedra sobre otra y sobreponer unas mamposterías sobre otras mamposterías, sino que, como sean partes diversas, tienen necesidad de diversas cosas e industrias".

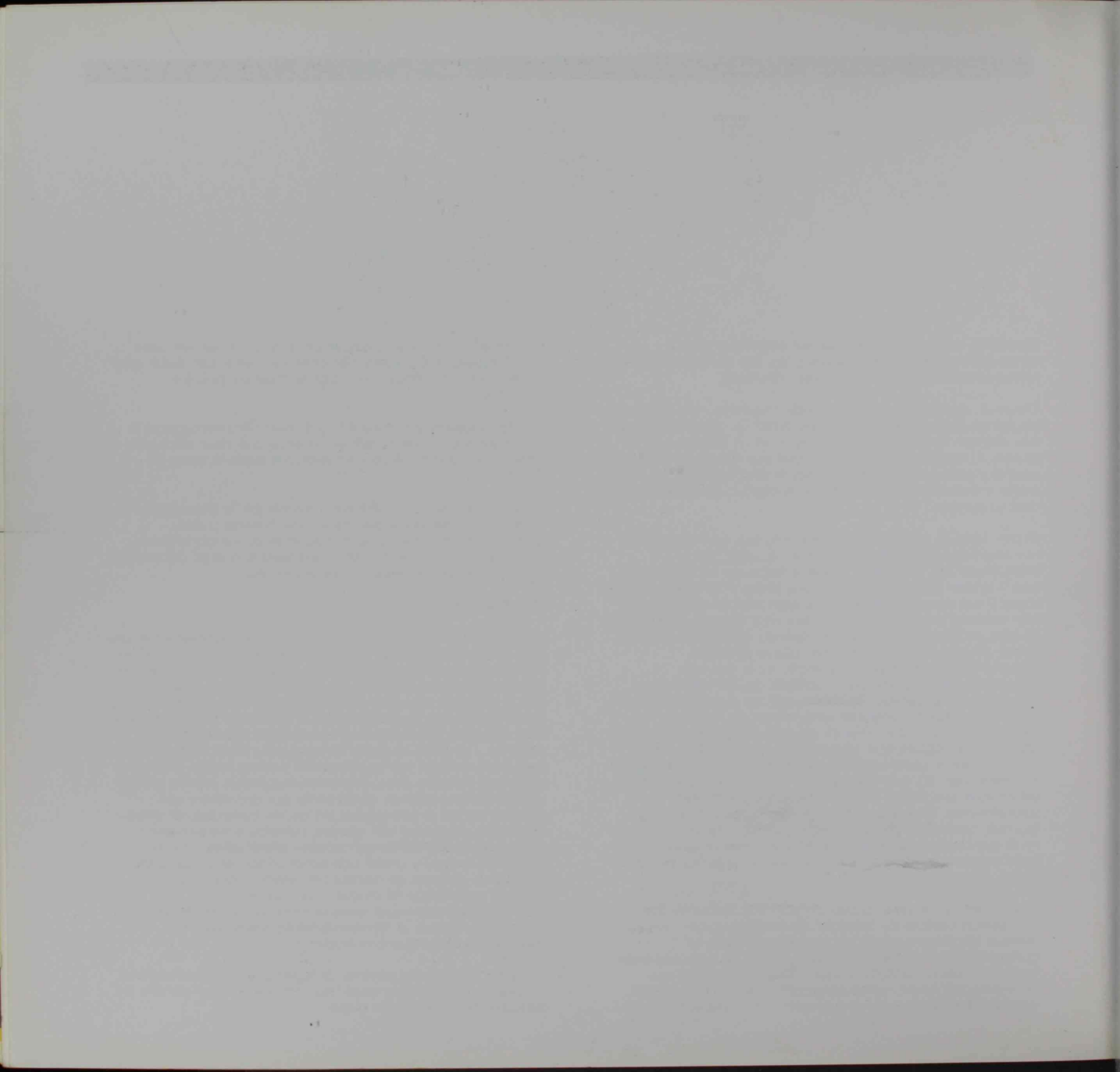
La diversidad de los materiales y elementos constructivos, la heterogeneidad de la construcción es lo que hace difícil que toda obra llegue a ser un solo cuerpo y perdure como tal (fig. 1).

No se trata sólo de la dificultad ofrecida por la diversidad de técnicas que serán idóneas para cada material o cada elemento constructivo, sino que además el comportamiento, heterogéneo también, de esos materiales a lo largo del tiempo no hará más que acelerar su envejecimiento.

El edificio vivo

Los materiales que forman un edificio tienen, curiosamente, una sola forma de reaccionar ante acciones exteriores tan diversas como las fuerzas gravitatorias y las variaciones de temperatura: esta respuesta es el cambio de dimensiones. Los enlaces que fijan la distancia entre las mínimas partes de un material son el único mecanismo de respuesta, a la vez fuerte y sensible, ante esas acciones. Esa fortaleza y sensibilidad ante las mismas acciones, es decir, el grado de respuesta, están determinadas para cada material por su estructura y composición. Diferentes materiales tendrán, pues, diferentes respuestas ante la misma acción. Ahora podemos comprender por qué Alberti nos prevenía contra la heterogeneidad de los materiales. Si estas respuestas diferentes son siempre cambios dimensionales producirán lo que llamamos cambios diferenciales. ¿Cómo puede ser "entera y unida" una construcción en la que cada material se deforma de manera diferente? ¿Cómo conservar firme un edificio que se mueve, que está vivo? Esta deformabilidad diferencial aparece como el más grave atentado que podría hacerse al "comportamiento solidario de los materiales y elementos constructivos".

Antes de estudiar las técnicas de agregación de los materiales, tendremos que conocer mejor estos movimientos y por ello les dedicaremos esta primera parte.





1. Las deformaciones que las acciones mecánicas producen en los materiales son uno de los más graves atentados contra su comportamiento solidario. La diferencia de compresiones entre el ábside y las torres ha producido este grave desorden en un rosetón de la Iglesia de la Sagrada Familia de Gaudí.

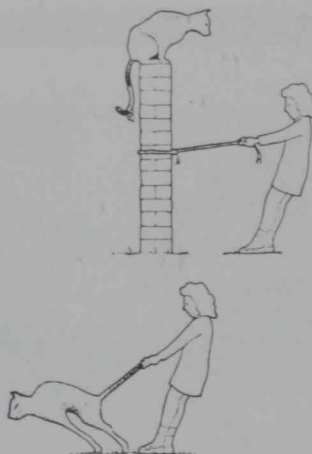
La ley de Hooke y la construcción

Cualquier elemento constructivo, un sillar por ejemplo, que recibe una fuerza exterior, habitualmente una carga gravitatoria, necesita que otro elemento ejerza sobre él una fuerza igual y de sentido contrario que equilibre la primera. Si no fuera así, ese sillar se pondría en movimiento uniformemente acelerado y se iría del edificio (fig. 2). Este sillar es capaz de trasladar la segunda fuerza al lugar donde se ha aplicado la primera para equilibrarla y garantizar la estabilidad del sistema simplemente soportando la carga que le llega.

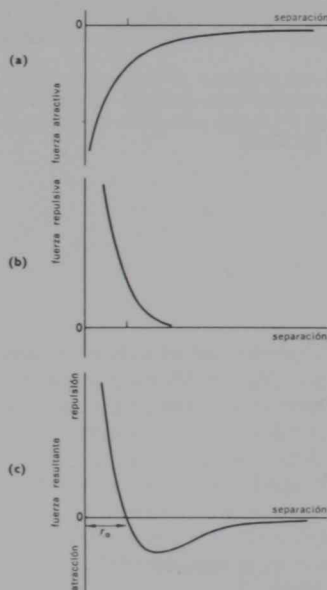
¿De dónde saca fuerzas el sillar para hacer esa traslación? O dicho de otra manera, ¿cómo soporta la acción de las dos fuerzas iguales y de sentido contrario que recibe? En fin, ¿por qué no se aplasta? Porque la distancia entre sus partículas está fijada por su estructura más profunda. Un magnífico divulgador de las ciencias físicas, J.E. Gordon (1), nos lo explica muy claramente:

“Cuando deformamos un palo o un muelle (flexionándolos, por ejemplo), los átomos y las moléculas que constituyen el material tienden a separarse o acercarse cuando todo el material es estirado o comprimido. Por lo que sabemos, los enlaces químicos que unen los átomos entre sí y, por tanto, mantienen el sólido unido, son muy fuertes e incluso rígidos. Luego el material en su conjunto sólo puede ser comprimido o estirado, estirando o comprimiendo varios millones de fuertes uniones químicas que se resisten vigorosamente a ser deformadas, incluso mínimamente. Estas uniones producen así las grandes fuerzas de reacción exigidas”.

La unión es de carácter electromagnético y es el resultado del equilibrio entre las fuerzas de atracción y de repulsión que existen entre las moléculas. Las primeras son inversamente proporcionales a la séptima potencia de su separación y las segundas lo son a la treceava potencia. Hay, pues, una posición de equilibrio en que la molécula tiene una energía potencial nula (fig. 3) (2).



2. "Querido, no le tires de la cola al gato." "Yo no tiro, mamá. Es Pussy quien está tirando." Gordon, con esta anécdota, pone en evidencia como un elemento constructivo portante ejerce acciones mecánicas sobre sus elementos soportados. Evidentemente, y volviendo a la anécdota, el gato tira y con la misma fuerza lo hace el muro del otro dibujo.



3. Los materiales recurren a las fuerzas electromagnéticas para dar respuesta a las acciones mecánicas. La combinación de las fuerzas de atracción (a) y de repulsión (b) da lugar a una resultante (c) que fija la distancia de equilibrio (r_0). Cualquier acción supone una variación de esa distancia y, por tanto, un cambio de tamaño, una deformación mecánica de la pieza.

Cuando el material se comprime, la distancia se reduce y las moléculas ejercen fuerzas de reacción y acumulan energía potencial. La suma de estas fuerzas permite al sillar equilibrar la acción y la reacción que sobre él se ejercen. Éste es el mecanismo con qué hoy nos explicamos la relación entre tensiones y deformaciones, trescientos años después que Hooke enunciase su famosa ley. Hooke no llegó más allá de determinar la proporcionalidad de deformaciones y fuerzas aplicadas dentro de un mismo "spring body" (cuerpo elástico), sin considerar la influencia de la forma de este cuerpo ni de su calidad material. Aunque, ciertamente, conocía estos límites, pues afirmó que "...esto es cierto no solamente para los cuerpos descritos, sino en todo otro cuerpo elástico sin excepción, tales como metales, madera, piedra, cerámica, cabellos, tejido de seda, huesos, tendones, vidrio y demás. Debe, naturalmente, prestarse atención a la forma particular del cuerpo deformado y al sistema más o menos adecuado que se utilice para curvarlo" (3).

Tan revolucionaria afirmación no tuvo consecuencias hasta que Euler analizó más detalladamente este factor de proporcionalidad en 1744 y, sobre todo, hasta que Young redactó la incomprensible definición de su famoso módulo. Benvenuto expone así esta evolución: "Aunque Euler había introducido un término constante para cada material que reconducía virtualmente la relación entre carga y deformación a la propiedad elástica del material, sólo con Young se llega a la individualización y a la reducción a una fórmula suficientemente correcta de aquello que hoy llamamos módulo elástico o módulo de Young.

Reproducimos la primera e incomprensible definición de 1807: "El módulo de elasticidad de cualquier material es una columna de la misma substancia capaz de producir una presión sobre su base que es el peso causante de cierta compresión, como la longitud de la substancia es la disminución de la longitud" (4).

Aún será necesario esperar unos años más, hasta 1822, para que Cauchy envíe a la Academia Francesa de Ciencias el documento en qué introduce los conceptos de esfuerzo y deformación unitaria.

La ley de Hooke queda ya definitivamente establecida como hoy la conocemos: la deformación relativa es directamente proporcional al esfuerzo o tensión unitaria e inversamente proporcional al módulo de elasticidad.

La indisoluble relación tensión-deformación

Pero no es esta laboriosa gestación de nuestra ley lo que nos interesa destacar, sino el concepto fundamental que subyace en ella, que ha sido tan difícil de entender para la historia como parece que lo es para el individuo: la absoluta e indisoluble relación entre tensiones y deformaciones. Ningún material será capaz de soportar ninguna acción mecánica, por fuerte que sea aquél y por pequeña que sea ésta, sin que ello implique alguna deformación, aunque sea imperceptible. La deformación es la matriz, el único mecanismo de respuesta de los materiales ante las acciones mecánicas. Una vez más,

Gordon nos lo explica: "Es importante darse cuenta que es perfectamente normal que cualquier estructura se deforme como respuesta a una carga. Si esta deformación es demasiado grande para el objetivo de la estructura, no es un error, una falta, sino una característica esencial sin la cual ninguna estructura sería capaz de trabajar"(5).

Debemos, pues, aceptar como absolutamente necesario o inevitable, aunque no deseable, que los materiales se muevan para responder a los esfuerzos mecánicos a que están sometidos. Es posible que este movimiento no sea preocupante desde el punto de vista estructural, ni afecte al comportamiento solidario de los materiales, si se trata de una deformación más o menos homogénea o lineal. Pero se convierte en un grave obstáculo para la satisfacción de nuestra ley fundamental cuando se trata de un movimiento diferencial, es decir, de dos materiales, en principio solidarios, que sufren deformaciones muy diferentes. Nos interesa, pues, conocer las razones y los casos en que se pueden dar estos movimientos diferenciales.

Iniciaremos este análisis considerando la incidencia en los movimientos relativos de las dos variables que recoge la ley de Hooke: la tensión y el módulo de elasticidad.

Movimientos diferenciales debidos a diferencias de tensión

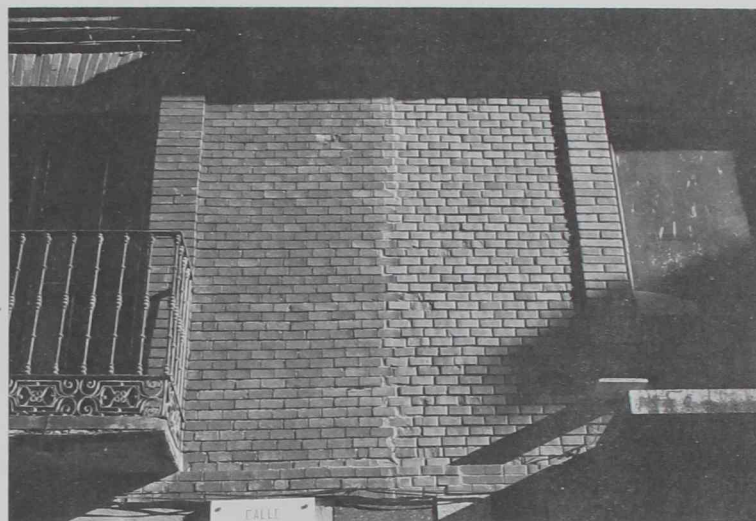
Si suponemos que los demás factores son constantes, es fácil comprender que la deformación sea proporcional a la tensión. El olvido de esta norma, por ejemplo en el caso de las cargas que el edificio transmite al terreno, suele tener consecuencias irreparables (fig. 1).

Es más raro el caso en que la tensión es diferente, no por diferencia entre las cargas, sino entre las áreas en que se apoyan.

Una carga vertical distribuida sobre un muro con contrafuertes muy separados provoca tensiones de compresión muy superiores en los lienzos entre los contrafuertes, ya que en éstos la carga se reparte sobre un área mayor. A esta tensión mayor corresponderá una deformación mayor y la diferencia puede ser tal que llegue a producir la independización de los contrafuertes, caso frecuente en la construcción clásica. J. Bassegoda reconoce el caso y aconseja una receta curiosa: usar, en los contrafuertes, un material con más mortero para compensar, con la deformabilidad del material, la menor tensión y así igualar los movimientos (disminuir la E para compensar la disminución de la superficie).

Existe otro grupo de movimientos diferenciales que puede asimilarse a los provocados por diferencias de tensión. Son los que sufren los elementos vecinos cuando uno de ellos ha sido construido con anterioridad al otro: el elemento más antiguo ya ha recibido sus cargas y se ha deformado para soportarlas; el nuevo está siendo construido y se deformará conforme vaya siendo cargado. A efectos de la deformación, el primero es un muro descargado (fig. 4).

Este problema es uno de los más difíciles que se ha planteado la construcción tradicional cuando ha intentado hacer solidarias



5. La adaraja es el sistema tradicional que intenta arriostrar muros de distinta edad. Es habitual que los ladrillos que forman esta especie de cremallera se partan al ser incapaces de transmitir el esfuerzo cortante que suponen tanto las deformaciones del muro ya asentado como las del muro nuevo. Este es un ejemplo en perfecto estado, en Medina de Rioseco, seguramente porque está muy bien ejecutado o, simplemente, porque es bajo.



4. El muro más reciente, el de la izquierda de esta fachada de la catedral de Orihuela, fue asentándose al recibir sus cargas, mientras que el de la derecha, más antiguo, ya estaba comprimido y asentado. La adaraja prevista fue incapaz de transmitir el peso que le correspondía, y se quebró el sillar superior. Serrallach aconsejaba dejar un vacío en ese tendel para permitir el asiento del muro joven.

dos fábricas de diferente edad o cuando se ha aplazado la construcción de ciertas partes de una obra.

Serrallach, en sus magníficos apuntes de 1873, nos lo explica (6):

"Precauciones que se han de tener en cuenta al elevar una fábrica cualquiera: 1. Elevar todos los muros a nivel, es decir, a la vez, a fin de que no se produzcan asientos desiguales. A veces, por circunstancias especiales, no se pueden subir todos los muros a nivel y, en este caso, hay que dejar de trecho en trecho la típica "lligada", como la llamamos en Catalunya, o bien hay que dejar en el muro de ladrillo unos entrantes y unos salientes llamados adarajas y endejas de boca de lobo; otras veces, se dejan unos entrantes y salientes en forma de escalinata que reciben el nombre de adarajas o endejas en escalinata. Estas últimas son las mejores. Cuando se deja una hilada sí y otra no, recibe simplemente el nombre genérico de enjarjes" (fig 5).

Más complicado es el caso cuando se trata de obras de diferente edad que conviene hacer solidarias, por ejemplo los muros portantes inferiores, delgados e inestables: "su estabilidad depende en gran manera del enlace de ellos entre sí. Si se han de ligar con paredes medianeras viejas que han hecho ya todos sus asientos, al hacer las ligadas, se producen agrietamientos, así que conviene no llenar las ligadas por la parte inferior (7).

Se intenta, así, permitir el descenso del muro joven, dentro del recorrido que permite el tendel que queda sin mortero y sin perjuicio que la estabilidad lateral quede garantizada.

El ingenio del constructor y la perfecta comprensión de estos fenómenos quedan de manifiesto en la solución que Serrallach da al problema "todavía más difícil" de la unión por testa de dos fachadas de diferente edad. Cuenta que en muchos lugares "las construcciones traban con las construcciones viejas y así es que se verifican en las uniones grandes resquebrajaduras por el efecto que en una casa el asiento ya está hecho y en la nueva está por hacer. Así es que el mejor sistema adoptado es el de hacer una especie de ranura de arriba a abajo en los dos edificios y así la nueva casa queda encajonada".

Sirvan estas citas como muestra de la atención que la construcción tradicional ha prestado al hecho de hacer compatibles la solidaridad de los elementos constructivos con las deformaciones mecánicas. Pero todavía es necesario insistir para ejemplificar las precauciones que se tomaban cuando las cargas homogéneas se repartían sobre superficies de diferente tamaño. Es el caso de un muro con contrafuertes que antes citábamos. Si no hay contrafuertes, el muro soportará una tensión determinada, la que resulte de dividir la carga por la superficie. Si hay contrafuertes, la mayor anchura del muro hará disminuir la tensión. Si las tensiones son diferentes, también lo serán las deformaciones y el muro se puede rasgar verticalmente en la unión entre ambas zonas. J. Bassegoda, en sus lecciones (8), aconseja algo tan sofisticado como hacer más gruesos los tendeles en los contrafuertes (lo que implica

usar ladrillos más delgados para asegurar la trabazón). La mayor cantidad de mortero de cal en esas zonas permitirá una respuesta más elástica para equilibrar, aunque sea groseramente, las diferencias de tensión con diferentes módulos de elasticidad y conseguir, así, una deformación parecida en ambas áreas.

En cuanto al primer caso, al de tensiones diferentes provocadas por cargas diferentes, la cantidad de soluciones tradicionales es tal que apenas es necesario citar alguna, aunque hoy, desgraciadamente, parecen todas olvidadas. Serrallach nos habla, por ejemplo, del cojinete, pieza de madera que debe repartir las cargas de las vigas sobre el muro para impedir "que las jácenas carguen en un solo punto" (fig. 6).

Movimientos diferenciales debidos a diferencias de módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad, ese factor que relaciona tensiones y deformaciones dentro del campo del comportamiento elástico, es específico de cada material. Como sus valores son muy amplios, las deformaciones de materiales sometidos a las mismas cargas serán muy diferentes y atentarán, por lo tanto, contra el deseable comportamiento solidario.

Para ayudar a memorizar y a comprender mejor qué suponen los diversos valores de los módulos de elasticidad, vamos a hacer un pequeño cambio de unidades.

Las unidades del módulo son las de la tensión, ya que Δ y L tienen la misma dimensión. Pero si expresamos L en metros, resulta que cada módulo de elasticidad dividido por mil es igual a la tensión que produce una deformación de un milímetro por metro, en ese material.

$$\sigma = \frac{\Delta L (m)}{L (m)} E = \frac{\Delta L (m)}{L (m) \times 1000} E = \frac{\Delta L (mm)}{L (m)} \times \frac{E}{1000}$$

Como la deformación de un milímetro por metro es un valor significativo, medio y fácil de recordar, bastará con olvidar los tres últimos ceros del módulo de elasticidad para saber cuál es la tensión que produce esa deformación tipo en un material.

Así, una arenisca de menos de 2.300 kg/m³ de densidad (ver cuadro adjunto) tiene un módulo de elasticidad entre 60.000 y 140.000 kg/cm², es decir, se deforma un centímetro por metro cuando está sometida a presiones de entre 60 y 140 kg/cm², cifra bastante inferior a su resistencia a la rotura, que es del orden de 300 a 500 kg/cm². Antes de romperse, teóricamente podría llegar a comprimirse hasta 5 mm/m. (Suponiendo un comportamiento elástico hasta llegar a esta rotura). (9).

La cerámica hueca, por el contrario, tiene un módulo de elasticidad de más de 200.000 kg/cm² y, dada su baja resistencia, nunca llegará a admitir deformaciones que se acerquen a 1 mm/m. Estas cifras se refieren, exclusivamente, a la pieza cerámica, no a la obra de albañilería.

La norma EH 82 establece el módulo de elasticidad del hormigón para cargas instantáneas en función de la resistencia característica (10).

$$E_{0j} = 21.000 \sqrt{f_j}$$

Esto supone que, para producir la deformación de referencia, será necesario aplicarle una tensión del orden de 300 kg/cm. Análogamente, obtendríamos los valores de 30 o 40 kg/cm² para los plásticos (CPV, metacrilato, etc.), 80 o 180 kg/cm² para la madera, etc.

De lo dicho, se puede ya concluir:

Que las deformaciones por compresión no superan casi nunca el milímetro por metro sin superar las tensiones admisibles.

Que el campo de módulos de elasticidad es muy amplio para materiales usuales, desde valores de 20.000 kg/cm² para un hormigón ligero, por ejemplo, hasta valores de 70.000 kg/cm² para algunas piedras. Pero esa dispersión no supone una enorme diferencia de deformaciones en la obra, ya que las tensiones admisibles no suelen ser inferiores a las que produce la deformación de referencia.

En principio, pues, las deformaciones que son consecuencia de la entrada en carga de los materiales podrían parecer poco significativas. Incluso teniendo en cuenta los fenómenos reológicos, es decir, la deformación aplazada de las piezas bajo cargas permanentes que provocan la fluencia del material.

El tema es más problemático si tenemos en cuenta las consecuencias de estas deformaciones de tensión y compresión en elementos portantes más complejos. Los elementos flectados, por ejemplo.

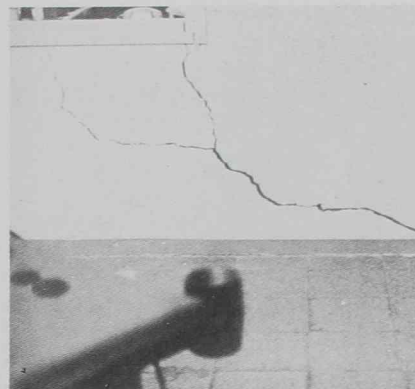
El mecanismo de la flexión hace que una viga, para que transporte hasta sus extremos las cargas que recibe, tenga que curvarse haciendo que, según la hipótesis de Navier, dos secciones próximas y paralelas giren relativamente, aproximándose por la parte superior y separándose por la inferior. Así, las fuerzas de repulsión generadas en la parte superior y las de atracción generadas en la inferior tienen como resultante un momento que equilibra el que producen las cargas que la viga recibe. La desproporcionada relación que hay entre el grosor de la viga y su longitud hace que un pequeño cambio de la distancia entre sus secciones suponga un importante descenso de la parte central de la viga. Éste es un movimiento de origen mecánico de una escala muy superior a la que suele corresponder a la compresión simple.

Recordemos que la normativa admite valores de flecha entre 1/500 y 1/300 de la luz, según los casos. Eso quiere decir que son previsibles movimientos de más de un centímetro en la mayor parte de los elementos flexionados, movimientos que pocos elementos constructivos vecinos podrán soportar (fig. 7).

Aunque las deformaciones producidas por diferencia de módulos elásticos tengan valores casi despreciables, (menos de 1mm para piezas normales) sus consecuencias pueden ser graves en otros campos, por ejemplo en el de la impermeabilidad de los elementos exteriores.



6. Las cargas concentradas sobre elementos continuos producen deformaciones diferenciales. Si el reparto de éstas es tal que no se excede la capacidad del material para soportar esfuerzos cortantes, las consecuencias no serán graves; de otro modo, aparecerán desórdenes como los que muestran algunos muros del Palacio Güell, estudiado por F. Mañá y R. Bellmunt.



7. En el caso de la flexión, la deformación mecánica tiene, por motivos geométricos, consecuencias dimensionales excepcionales. Es habitual que algunos elementos constructivos no puedan asumir sus deformaciones, como por ejemplo esta fachada de ático situada sobre un forjado excesivamente deformable (fichas de patología del O.C.E.).



8. La diferencia de módulos de elasticidad entre los materiales que forman parte del mismo muro puede llevar a concentraciones de cargas en el más rígido o a la desolidarización de los dos elementos que sufren diferente deformación. En esta esquina de la Iglesia de Sarrià, en Barcelona, la mampostería busca una mejor trabazón con la sillería insertando piedras de mayor tamaño en los puntos donde es previsible la rotura de la fábrica de mampostería, incrementando así el módulo de elasticidad y la resistencia de esta última en su unión con la primera.



9. La carga homogénea sobre una superficie heterogénea produce también una diferencia de tensiones unitarias cuyas consecuencias son clásicas en los muros de contrafuerte. Los contrafuertes de los tambores de cúpula no cargados no se deforman. Si la unión entre contrafuerte y tambor es débil y no puede hacer que entren en carga, se producen fisuras como las de este contrafuerte de San Pedro de Roma. Maqueta original conservada en el Museo del Vaticano.

La inversión del proceso. De las deformaciones a las tensiones

Incluso la estabilidad general del edificio puede verse amenazada por las secuelas de estas deformaciones. Por ejemplo, si dos materiales de diferente elasticidad forman un solo elemento constructivo, sometido a una carga cualquiera, de modo que la deformación de ambos deba ser la misma, cuando sufran una mínima deformación bajo una carga cualquiera, la simple aplicación de la ley de Hooke nos dice que la tensión a que está sometido el elemento más rígido será mayor que la del más elástico. Si el resto de parámetros son constantes, las tensiones serán directamente proporcionales al módulo de elasticidad. Éste es el caso de los pilares de la catedral de Milán, contruidos con un núcleo de granito de Serizzo y revestidos con gruesas piezas de mármol de Candoglia colocadas a hueso. La mayor rigidez de este material ha hecho que el esfuerzo asumido por el envoltorio para la misma deformación mecánica sea 2,4 veces superior a la del núcleo. Este esfuerzo, muy superior a la compresión media prevista para el pilar, ha provocado la fisuración de dicha carga exterior, poniendo en peligro la estabilidad del "Duomo".

Circunstancias de este tipo se dan más frecuentemente de lo que creemos en la construcción cotidiana. Cada vez que edificamos muros mixtos con una parte de piedra y una parte de albañilería o de hormigón, hemos de tener en cuenta que la tensión asumida será proporcional a la rigidez (fig. 8).

La ley de prioridad en el descenso de cargas

Lo expuesto en el punto anterior supone que el descenso de cargas del edificio se produce por elementos de mayor rigidez.

Por lo menos, estos elementos asumen las tensiones proporcionalmente a su módulo de elasticidad con absoluta independencia de los deseos de su diseñador, salvo que éste haya previsto los mecanismos necesarios para evitar su deformación bajo las cargas. Si estos elementos más rígidos son suficientemente resistentes, el edificio queda ya estabilizado. Esto ocurre cuando los elementos rígidos son los previstos para soportar el edificio. Si estos elementos rígidos no son suficientemente resistentes (porque no son los elementos estructurales), se romperán y se producirá una deformación complementaria que generará la reacción necesaria en los elementos que tienen encomendada la función portante.

La imprevisión de esta prioridad mecánica de los elementos rígidos al imaginar el descenso de cargas implica, frecuentemente, el deterioro de muchos elementos, como los vidrios que están en contacto con dinteles, los muros sobre extremos de voladizos y los tabiques entre forjados flexibles.

En efecto, muchas veces un elemento asume tensiones impensadas porque su forma, y no el material constituyente, lo hace rígido. Así, el tabique es una viga pared de gran canto, más rígida que cualquier forjado, aunque la albañilería que lo forma tenga un módulo de elasticidad inferior al del hormigón (fig. 7).



10. Los alféizares de piedra se rompen, como los dinteles, porque no son capaces de repartir sobre el muro la carga concentrada de las jambas, como en esta ventana de Uncastillo (Zaragoza).



11. Para evitarlo, se puede recurrir al notable incremento de las dimensiones del alféizar que lo capacita para repartir la carga. Esa es la solución gallega, que se justifica por la abundancia de materia prima...



12. ... o liberando al alféizar de la respuesta mecánica del antepecho. Esto puede conseguirse dejando un amplio tendel que se llena de mortero después de la entrada en carga del muro, como en el caso del castillo de Ciutadella, en Lleida.



13. También puede evitarse la entrada en carga del alféizar dejando hueco su espacio inferior hasta que, acabada la obra, se obture el antepecho con una gran piedra plana.

Este componente geométrico de la rigidez puede llevar a situaciones paradójicas. Veamos el caso de un muro de dos hojas de albañilería en la fachada de un semisótano. La hoja exterior suponemos que se apoya en un muro de contención de sótano y, por tanto, sólo tiene del orden de un metro de altura, mientras la hoja interior dobla dicho muro y tiene, por ejemplo, tres metros de altura.

Si ambas hojas son sometidas a la misma carga, su parte superior descenderá en ambas la misma altura. La hoja más corta, según la ley de Hooke, absorberá tres veces más carga

que la hoja más alta, puesto que está sometida a una deformación relativa tres veces superior.

Si hemos dicho que esta consideración era un poco esquemática es porque, evidentemente, también el muro de contención sufrirá alguna deformación. En realidad, se trata siempre de elementos de diferentes materiales más que de diferente longitud, pero valga esta simplificación para una más fácil comprensión del fenómeno cuando la diferencia de elasticidad es notable.

Las precauciones necesarias para impedir la entrada en carga de los elementos rígidos no resistentes corresponden tanto al diseño de los elementos rígidos -lo analizaremos en el segundo tomo de este texto- como al de la tecnología de ejecución. Veamos el ejemplo que nos ofrece la ejecución de un muro de cantería (fig. 9).

Cualquier hueco en un muro portante supone una concentración de cargas en sus bordes. En efecto, la carga que asume el dintel debe ser soportada por las jambas de la ventana. Este elemento, generalmente más rígido por ser de mejor material y de piezas de mayores dimensiones, puede estar cuatro o cinco veces más cargado que un paramento macizo cualquiera. Por ello es lógico que se prevean y ejecuten con cuidado las correspondientes adarajas. Pero, por otra parte, la jamba debe transmitir esa carga concentrada al alféizar, otra pieza rígida de piedra que corona el antepecho y reúne a ambas jambas cerrando el hueco. El alféizar, pues, está sometido a dos cargas concentradas en sus extremos y colocado sobre una superficie continua y homogénea de igual módulo de elasticidad y capacidad portante. Puesto que la respuesta en términos de deformación del antepecho es proporcional a la tensión de los extremos del alféizar, éstos descenderán y quedará inmóvil su parte central. Si el alféizar no está dimensionado de manera que se distribuyan las cargas sobre toda la longitud del antepecho, lo más probable es que se parta por la mitad (fig. 10). En realidad, su comportamiento debe entenderse como simétrico con el del dintel (fig. 11). No

obstante, debe ser posible evitar la repetición de una piedra de especiales dimensiones para la labor del alféizar por una mínima atención a la economía de la obra. Nada más sencillo que evitar esa situación en el alféizar; eso es lo que siempre ha hecho la construcción tradicional impidiendo que su parte central se apoye sobre el antepecho. Para ello, basta edificar toda la obra dejando un hueco triangular con un vértice apuntando hacia abajo en el antepecho, de manera que las cargas de las jambas se transmitan al muro inferior con un sistema de reparto progresivo. Este hueco se cerrará, cuando la obra haya hecho todo su asiento, con cualquier tipo de mampostería o, como es tradicional en la masía catalana, con una piedra plana que libera así una gran sección del muro para formar esos dos pequeños bancos que se llaman "festejadors" (fig. 12). La tradición del norte de Europa tiende a dejar siempre libre el espacio entre alféizar y antepecho para evitar que cualquier movimiento posterior pueda hacer que el primero entre en carga (fig. 13). Así lo señala Esselborn (12), el cual consigue así reducir el alféizar a su mínima expresión. La norma NTE recoge también esta solución.

La comprensión -fácil sólo en apariencia- de estos mecanismos, que son consecuencia de la deformabilidad mecánica de los materiales, a pesar de su complejidad fue profundamente asimilada por la construcción tradicional y no puede desaparecer bajo el superficial tecnologismo que aceptamos con demasiada confianza y que puede conducirnos al olvido de los principios más elementales de la construcción.



1. Quinlan Terry justifica su elección de los materiales tradicionales, como la piedra en la Waverton House de 1979, entre otras razones, por los bajos valores de su coeficiente de deformación térmica.

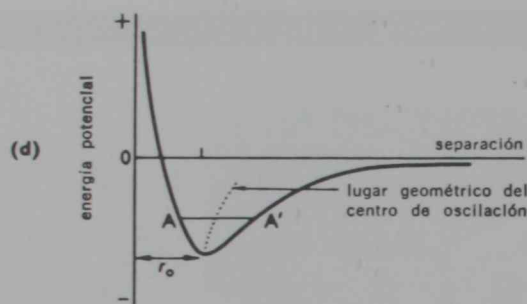
La durabilidad de una construcción sometida a importantes movimientos diferenciales es muy comprometida y el envejecimiento de su aspecto es, con toda seguridad, prematuro y poco agradable. Los materiales tradicionales: la piedra, el ladrillo y el mortero de cal son estables y envejecen mejor. Estas razones, y a veces otras más próximas a la ingeniería postmoderna, están llevando a algunos arquitectos a utilizar, en lo posible, los materiales de siempre. Quinlan Terry ha hecho de ello una postura emblemática (fig. 1). Éste es uno de sus "Siete malentendidos sobre la arquitectura clásica", aunque no uno de los más importantes (1). Terry justifica su postura con razones estrictamente económicas y acusa a los materiales modernos de ofrecer ventajas de coste que lo son únicamente a corto plazo, puesto que su mantenimiento es muy exigente. Defiende su razonamiento citando al Director de la BRS "los mejores materiales de construcción son prácticamente inertes, el gran defecto de los materiales modernos es su alto coeficiente de expansión".

Esta reconsideración del papel de los materiales tradicionales está hoy en la encrucijada de caminos muy diversos de la concepción arquitectónica.

Tanto desde consideraciones estrictamente técnicas, del orden de las que aquí se van a hacer, como impulsados por la voluntad de recuperar la riqueza expresiva y la conexión con formas de gran arraigo en la cultura arquitectónica, los materiales tradicionales son objeto del máximo interés en el proyecto contemporáneo.

Los movimientos de origen térmico

Los elementos constructivos expuestos a importantes cambios de temperatura sufren, como consecuencia, importantes deformaciones que pueden hacer imposible su necesario "comportamiento solidario". Los encuentros entre materiales que se deforman en diferente dirección, que sufren diferentes



2. Al incrementarse la temperatura y por tanto la energía potencial, el valor r^0 que fijaba la distancia de equilibrio aumenta por la asimetría de las dos ramas situadas por encima y debajo del mismo. Los cuerpos, por tanto, incrementan su volumen.

cambios de temperatura o, simplemente, que reaccionan de diferente manera ante los mismos, pueden estar sometidos a tensiones insoportables.

El origen de estos movimientos es el mismo que el de los movimientos mecánicos. Los cuerpos, al aumentar de temperatura, acumulan energía potencial y modifican las distancias que fijan sus enlaces. La curva de energía potencial, resultado de las fuerzas intermoleculares, que veíamos en el capítulo anterior, tiene su mínimo en el cero absoluto de temperatura (fig. 2). A una temperatura "más elevada tienen una energía extra como resultado de su movimiento aleatorio que les permite elevarse desde la parte inferior del valle hasta su nivel AA'. En este nivel, (las moléculas) podrán oscilar entre esos dos límites transformando su energía potencial en cinética y de nuevo en potencial. Debe señalarse que, como la curva es asimétrica, el lugar geométrico de los centros de oscilación no se queda en r^0 , sino que se desplaza ligeramente como indica la figura 1. Esto quiere decir que el material se dilata al calentarlo, ya que todos los centros de oscilación de las moléculas se mueven alejándose entre sí" (2).

La suma de estos millones de modificaciones elementales implica el incremento de volumen del cuerpo. Este incremento será proporcional al tamaño y a la importancia del cambio de temperatura. Por otra parte, cada material, de acuerdo con su estructura interna, reacciona de una manera más o menos enérgica ante los cambios de temperatura. Esta capacidad de reacción caracteriza cada material y se expresa a través de lo que llamamos módulo de deformación térmica: α . La expresión que reúne estas relaciones será pues:

$$\Delta L = \alpha \times L \times \Delta t$$

Vamos a analizar brevemente los valores que toman estas variables.

El módulo de deformación térmica lineal

Este módulo mide la deformación relativa por grado centígrado y su valor es creciente para los materiales más modernos. De 4 a 8×10^{-6} para las piedras, salvo algunas areniscas y los ladrillos cerámicos. Algo superior para el hormigón: de 6 a 10×10^{-6} , según se trate de hormigones de áridos de recebo o de canto rodado. Aún mayor para los metales: entre los 10×10^{-6} de la fundición o 12×10^{-6} del acero y los $23,5 \times 10^{-6}$ del aluminio e incluso los 28×10^{-6} del plomo. Las cifras más altas las alcanzan los plásticos, que se mueven entre los 20 y los 90×10^{-6} .

Las variaciones de temperatura

Su rango puede extenderse desde -20°C al exterior, en invierno, a 85°C y más, al sol y cerca de los aparatos de calefacción. La variación puede cambiar mucho entre los elementos contiguos; por ejemplo, al sol, un muro macizo enjabelgado podrá no llegar a 15°C , mientras que, al lado, el palastro negro bajo vidrio estará a 100°C " (3).

La BRE establece para sus cálculos unas oscilaciones mínimas

de 70°C, para los materiales menos sensibles, aunque advierte que éstos pueden alcanzar fácilmente los 85°C. Para los metales y los plásticos deben preverse oscilaciones entre 85 y 105°C, mientras que el vidrio solar llega a los 115°C (4).

Son realmente valores mucho mayores de lo que solemos suponer, habituados como estamos a utilizar las cifras de la temperatura ambiental.

Cuantificación de los movimientos térmicos

El producto de los valores del módulo de deformación térmica por las oscilaciones de temperatura establecidas para cada tipo de material daría como resultado su variación longitudinal relativa. La preferencia anglosajona por las apreciaciones más empíricas les ha llevado a medir esta variación directamente en diversos tipos de materiales; esto además de facilitar el trabajo, ha hecho mucho más fiables los resultados. En un artículo titulado "Edificios activos", Bill Allen resume el trabajo hecho en la BRS y ofrece directamente las variaciones térmicas en milímetros por metro para los rangos de temperatura habituales en Inglaterra (5).

El valor de referencia será el milímetro por metro, que corresponderá a la deformación lineal de un material con $\alpha = 10 \times 10^{-6}$, sometido a oscilaciones de temperatura de 100°C. Éste es el valor que, según el citado artículo, debe utilizarse para prever y evaluar las deformaciones de los morteros colocados al exterior, pero la cifra puede ser algo superior para hormigones de áridos silíceos (1,2 mm/m) y algo inferior para los áridos calizos (0,6 mm/m).

Los materiales tradicionales quedan algo por debajo del valor de referencia (0,7 mm/m para la albañilería y entre 0,5 y 0,9 mm/m para la mayor parte de las piedras).

La madera aún puede estar por debajo de estos valores, pero las cifras concretas dependerán incluso de su corte.

Los demás materiales, los más modernos, quedan por encima del valor de referencia, y recorren un amplio campo que va desde aquel valor para el acero hasta 2 mm/m en el caso del aluminio, 3,3 mm/m en el del plomo y 3,5 en el del zinc, considerado en su sentido de laminación.

Los plásticos llegan a valores todavía superiores: la urea-formol llega a los 5 mm/m. Pero el récord de los materiales de construcción se lo lleva el asfalto, con un valor de 8,8 mm/m. Y recuérdese que estas experiencias de medición directa se realizaron en Gran Bretaña, donde el margen de variación de temperatura debe ser, lógicamente, mucho más estrecho que en algunos de nuestros climas.

Los movimientos diferenciales

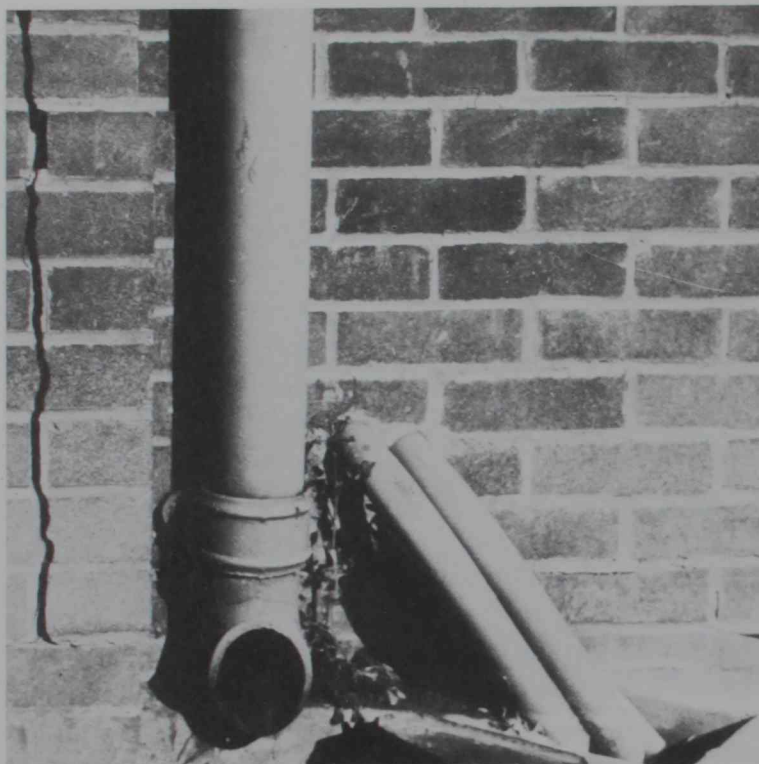
La variación dimensional como respuesta a las oscilaciones térmicas es una característica física universal que no tendría en sí aspectos negativos si no fuera porque la construcción, como quería Alberti, se basa en el comportamiento solidario de sus materiales y elementos constructivos. Un elemento cualquiera



3. Cuando un elemento constructivo ve imposibilitada su deformación térmica por estar contenido rigidamente entre elementos más resistentes, es frecuente que se rompa, como este tabique pluvial barcelonés. El tabique medianero es un virtuosismo catalán que exige la ventilación de la cámara para evitar que se eleve demasiado la temperatura, los lienzos no excesivamente grandes, los apoyos sobre pilastras relativamente elásticos y, sobre todo, la plasticidad del tradicional mortero de cal.

no puede contraerse y dilatarse libremente porque está unido a otros elementos o limitado por otros elementos que quizá permanecen inamovibles o se deforman en otra dirección o incluso en sentido contrario (fig. 3). Uno de los aspectos que miden la importancia de cada problema concreto es el valor que la deformación toma en ese punto de unión. Esa deformación está en función de las cifras que acabamos de ver y de la longitud de la pieza. Así, una pieza de deformabilidad media (1 mm/m) y un metro de longitud (un dintel de hormigón) se deformará 1 mm, un ladrillo o una teja sólo se deformará $0,7 \times 0,30 \text{ m} = 0,21 \text{ mm}$, un perfil de aluminio de una carpintería de 4 m llegará a deformarse 8 mm, y una pieza asfáltica de 6 m puede deformarse hasta 50 mm.

Es evidente que el incremento progresivo del tamaño de los modernos materiales de construcción es una de las causas más graves de la existencia de importantes deformaciones en las obras. También un gran lienzo de albañilería es una pieza que se deforma, pero cada ladrillo tiene una junta en que la plasticidad del mortero de cal y la posibilidad de microfisuras inofensivas simplifican el problema radicalmente (fig. 4). Si ese lienzo de pared fuese monolítico y rígido (como lo es un gran panel de hormigón), la deformación, en lugar de distribuirse, quedaría concentrada en un solo punto y, por tanto, en lugar de microfisuras tendríamos grietas (fig. 5).

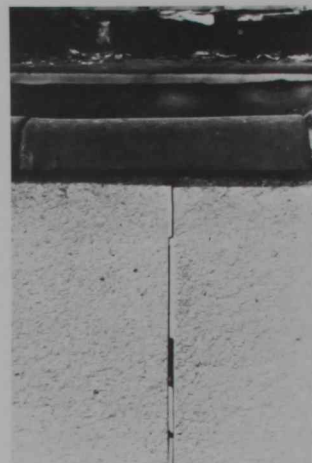


4. La fábrica de ladrillo tiene un magnífico comportamiento térmico gracias al pequeño tamaño de sus piezas, es decir, a la frecuencia de sus juntas y a la plasticidad que presta a éstas el mortero de cal. Las innumerables microfisuras que suelen surgir son inofensivas, incluso para la impermeabilidad del muro, si éste está bien diseñado. Sin embargo, en sus ángulos y retranqueos el muro perpendicular aparece como un límite a la deformabilidad que puede producir, en casos límite, roturas espectaculares como ésta.

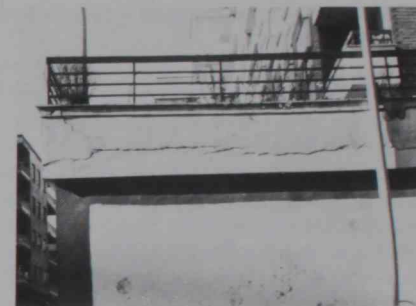
Así pues, los tres términos de la ecuación: el tamaño, el módulo y la variación de temperatura deben tenerse en cuenta al prever las consecuencias de los movimientos que pueden originarse si existen diferencias importantes entre ellos.

Pero el más grave de todos ellos, a efectos de los movimientos diferenciales, es, actualmente, el tercero de los citados. La diferencia de temperatura entre la cara exterior e interior de un mismo elemento constructivo puede llegar a ser muy importante. La cara exterior, sometida a las oscilaciones térmicas del ambiente y a la radiación solar directa, puede sufrir tremendas variaciones al pasar de una tarde soleada a un frío amanecer en un mismo día de otoño. La cara interior se mantendrá a la temperatura templada del espacio interior. En ambas caras se producirán deformaciones diferenciales de signo contrario y de tal amplitud que es posible que la estructura interna del elemento constructivo no pueda soportarlas.

Como veremos en el punto siguiente, el intento de eliminar o limitar las deformaciones térmicas sólo puede hacerse si se ejercen importantes esfuerzos mecánicos: o el elemento constructivo se curva en sentido convexo hacia la zona más



5. El incremento del tamaño de las piezas concentra, en las juntas, deformaciones que los materiales de relleno tradicionales difícilmente pueden asumir, como en estas placas de piedra artificial del dispensario antituberculoso de Barcelona (J.L. Sert, Torres, Subirana).



7. El hormigón que forma las pendientes se ha deslizado sobre el forjado impulsado por la deformación térmica.

caliente, lo que producirá fisuras en la cara de la construcción convencional, o los elementos periféricos estables impiden la deformación introduciendo las correspondientes tensiones.

Este problema se agrava cuando se introduce una lámina aislante entre las dos caras del elemento constructivo. La hoja exterior no puede evacuar calor hacia el exterior, lo cual eleva aún más su temperatura. La hoja interior todavía está más protegida. El salto térmico es mayor y las uniones entre ambas hojas, escasas, se ven sometidas a tensiones enormes.

Las dos posturas en el modo de enfrentarse a los movimientos

Ante la importancia progresiva de los movimientos térmicos diferenciales en la edificación, pueden adoptarse dos posturas: la coercitiva o la permisiva. La primera intenta impedir las deformaciones estableciendo un sistema de uniones suficientemente rígidas y reforzadas. Es la que suelen proponernos los constructores más cuidadosos cuando tememos que el empuje de la azotea plana, mal realizada, desplace el murete del antepecho marcando la habitual fisura en la tersa fachada revocada: "No se preocupe, lo ligaremos bien ligado, dejaremos un redondo del ocho a cada palmo del forjado y encofraremos un murete de hormigón entre los dos tabiquillos cerámicos".

Analicemos este fenómeno un poco más de cerca. Si queremos anular la deformación térmica oponiéndole una acción mecánica, podemos imaginar que primero permitimos aquella deformación y que luego comprimimos la pieza hasta devolverle la longitud inicial. Para que esto sea posible, la



6. Los empujes térmicos de una azotea pueden ser importantísimos si no se prevén las juntas necesarias. Ningún antepecho, por rígido que sea, puede contenerlos.



8. Esta imagen de la reciente cubierta del Palacio de la Virreina de Barcelona demuestra la importancia de los movimientos de las azoteas, incluso las de cerámica, como se puede comprobar por la expulsión del betón con que, defectuosamente, se intentaron llenar sus juntas.

deformación térmica y la mecánica deben ser iguales.

$$\Delta L = \alpha \times L \times \Delta t = L \times \frac{\sigma}{E}$$

Es decir, que la tensión que debemos ejercer es:

$$\sigma = E \times \Delta t \times \alpha$$

Lo cual, y para los valores de referencia que estamos tomando $E = 1 \times 10^{-5} \text{ kg/cm}^2$ $\Delta t = 100^\circ\text{C}$; $\alpha = 10^{-5} \text{ mm/m}$ supone una tensión de 100 kg/cm^2 .

Como estos valores de referencia se aproximan a los de un hormigón ligero, podemos decir que, si la losa tiene 10 cm de espesor de hormigón, empujará sobre el murete con una fuerza de $(10 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 100 \text{ kg/cm}^2) 100 \text{ Tm/m}$. Esta fuerza no puede ser soportada por ningún medio convencional (fig. 6 y 7).

Debe notarse que el valor de esa fuerza de empuje de origen térmico es independiente de la longitud. Sorprendentemente, empuja con igual fuerza una pieza de 1 m que otra de 10 m. La diferencia está en que la primera deja de empujar en cuanto consigue que se le permita una deformación de 1 mm, y eso es relativamente fácil, mientras que la segunda exigirá una

deformación de 10 mm antes de relajarse totalmente.

Leczner, en un libro que dedica específicamente al estudio de los movimientos en la edificación (6), dice que esta solución puede ser utilizada siempre que "se esperen tensiones relativamente pequeñas en los elementos de unión". En el caso que acabamos de citar, la barandilla descrita hubiese soportado el empuje de la solera dilatándose bajo diferencias de temperatura entre 5 y 100°C . Es difícil pensar que esta solución pueda ser válida cuando las tensiones están localizadas, pero, evidentemente, la solución coercitiva es la que está en la base de toda la construcción tradicional. Es más, es la que directamente pedía Alberti cuando exigía una construcción "entera y unida". Un grueso muro de mampostería puede sufrir en su haz exterior elevaciones graves de temperatura antes que se haya iniciado el cambio en la cara interior y no por ello el muro tiene que dividirse en dos. La construcción "maciza", como veremos más adelante, sigue siendo una de las alternativas válidas en la edificación de hoy, pero el caso citado tenía a su favor el pequeño tamaño de las piezas, la utilización del mortero de cal y un módulo de deformación térmica muy bajo combinado con un módulo de elasticidad correcto y con una resistencia mecánica alta, pero,



9. Las vidrieras góticas de la catedral de León recurren inteligentemente a una solución no coercitiva. Los importantes movimientos diferenciales de este complejo de vidrio, plomo, hierro y piedra quedan relativamente libres entre los puntos de fijación formados por estas cuñas.

sobre todo, con una distribución gradual de las diferencias de temperatura a lo largo de la sección y, en consecuencia, de las deformaciones.

La que llamamos solución permisiva es la que parece más adecuada para resolver, en parte, los graves problemas de la construcción contemporánea. Se basa en uniones de tipo deformable que intentan conseguir que el comportamiento global de la edificación sea solidario y que cada elemento pueda deformarse con cierta libertad.

Dejaremos para la segunda parte de este texto el análisis y la propuesta del tipo de construcción a que esta solución nos lleva. Aquí vamos a recorrer sólo algunos puntos que pueden facilitar este planteamiento "permisivo" de las deformaciones desde el punto de vista térmico.

La importancia de construir en primavera o en otoño

Para reducir la importancia de las deformaciones será necesario, según la ecuación fundamental, utilizar materiales inertes (de bajo α), de pequeñas dimensiones y, sobre todo, evitar los grandes saltos térmicos. Una superficie puede protegerse simplemente pintándola de un color claro: un muro con cámara, de 28 cm de espesor, expuesto al sol, alcanza los 31,5°C sin pintura y los 25°C encalado. También puede protegerse si se cubre: una cubierta plana de asfalto sobre aislamiento de corcho estaba a 45°C y descendió a 32,2°C cuando se cubrió con grava blanca y limpia (7).

La radiación solar directa es, evidentemente, la fuente de mayores problemas porque es la que provoca en los materiales temperaturas extremas muy superiores a las ambientales.

El sentido común ha guiado siempre la resolución de los problemas que planteaban los movimientos térmicos, ya sea reduciendo el incremento de temperatura, o sea, incidiendo sobre el módulo de deformación térmica, ya sea limitando el tamaño de las piezas. Aunque este problema era menor en la construcción tradicional, los elementos más conflictivos, como la azotea a la catalana, ya los habían planteado. La azotea a la catalana no sólo debe ser libremente dilatante en su perímetro, sino que tiene sus dimensiones limitadas por esas deformaciones. Cuando su uso se extrapoló del catastro rural del Maresme a las grandes parcelas del Ensanche barcelonés, esta magnífica solución tradicional fracasó estrepitosamente. (Véase volumen III).

La sabia experiencia tradicional se recoge en el consejo de Serrallach, cuando recomienda que la última hoja de rasilla de la solera que forma la azotea se coloque en primavera o en otoño (8).

Cien años después, la BRS (9) recomienda, tras una larga investigación, que "si no se conocen previamente los pronósticos meteorológicos de la época de ejecución, es preferible partir de un estado térmico medio para los elementos sensibles al calor".

La prudencia de Serrallach no se extendía a estos elementos constructivos porque los materiales tradicionales eran mucho más inertes ante los cambios de temperatura y sólo las delicadas azoteas exigían estos cuidados.

La construcción de hoy es mucho más compleja porque se basa en una gran variedad de materiales con módulos de deformación muy diferentes y, en general, muy elevados.



1. La Iglesia de Mota del Marqués muestra la estructura tradicional del muro de tres hojas. Las dos hojas exteriores están formadas por piezas de mayor tamaño y tienen, además, diferentes grados de talla. La interior, de relleno, está formada por elementos pequeños más o menos aglomerados.

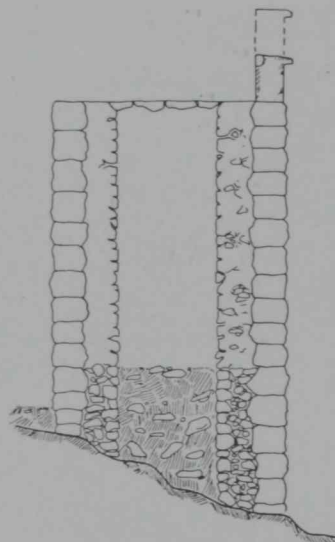
El contenido de agua de los materiales de construcción es, en muchos casos, elevado y cambiante. El cambio de humedad supone una pérdida o ganancia de agua que, sea a escala molecular o a mayor escala, implica variaciones dimensionales en los materiales. Pueden ser movimientos de origen muy diverso. Algunos sólo son consecuencia de la pérdida de un agua que era necesaria para la puesta en obra, como en el caso de los aglomerantes hidráulicos. Otros pierden o ganan agua a consecuencia de su proceso de extracción, como la madera, o a consecuencia de su proceso de fabricación, como la cerámica, etc. Todos éstos son procesos irreversibles de cambio de humedad y provocan movimientos que, por tanto, son también irreversibles.

Por el contrario, las variaciones ambientales de humedad pueden hacer que determinados materiales especialmente higroscópicos alteren su contenido de agua retrayéndose o entumeciéndose en procesos que llamaremos reversibles.

La construcción tradicional ha tenido muy en cuenta estos movimientos que pueden aparecer hoy a los ojos de algunos como un cuidado nuevo que exige la técnica moderna a partir de los peligros de retracción del hormigón y, sin embargo, tienen una larga historia en la práctica edificatoria.

Breve historia de un muro

Más que salpicar este texto de citas puntuales, puede ser interesante recorrer la historia de un elemento constructivo de origen inmemorial: el muro de dos caras con un núcleo relleno. Este tipo de muro, el más ampliamente utilizado en todos los momentos de la historia de la construcción en piedra, ha conseguido su longevidad a pesar de su intrínseca incongruencia; la hoja central, el núcleo, más rico siempre en pasta de aglomerante hidráulico, se retrae con mucha mayor intensidad que las caras de materiales duros y de juntas delgadas, provocando la disgregación del muro y la



2. Este esquema de J. Martin, de los muros que rodean a Gortys en Arcadia, muestra la antigüedad y el grado de elaboración del "emplecton" griego.



3. Las hojas exteriores pueden tener grados de acabado muy diversos. Estos muros de Pérgamo tienen un aparejo rectangular pseudo-isódomo.

insolidaridad de sus componentes. Una discusión interminable sobre el papel portante que asume, en cada momento de la historia de la construcción, cada una de las caras, ha constituido una larga y difícil polémica. En ella se han enzarzado todos los grandes tratadistas y especialmente Vitrubio, Serlio y Rondelet. Sirva, pues, el muro de tres hojas como muestra de la atención histórica que la construcción ha prestado a las retracciones.

El "emplecton" clásico

El muro de dos caras con relleno central apareció en Grecia en el siglo VII a.C. y se desarrolló ampliamente durante el siglo VI (1). Está formado por dos hojas de mampostería en seco cuyo hueco central se ha rellenado con "una mezcla de tierra de arcilla, de piedra partida y de deshechos de cantera, formando la estructura del muro designada con el término de "emplecton" (2). Cuando se utiliza como muro de protección de la ciudad, su espesor oscila alrededor de los tres metros, aunque puede llegar hasta los cinco (fig. 2).

El arqueólogo Martin hace notar su extrañeza por la vitalidad secular de este tipo de construcción que se mantiene en la Grecia clásica hasta el muro de Adriano en Atenas, a pesar de los inconvenientes que supone "la falta de solidaridad entre los dos paramentos montados independientemente el uno del otro". E inmediatamente analiza "los ensayos que se intentaron para remediar este inconveniente y convertir esta construcción en otra más homogénea" (Martin, loc.cit.). Las soluciones que recoge a continuación tienden todas a sustituir un núcleo demasiado "pastoso", y por lo tanto susceptible de retracción, por una masa pétreo de diversos tipos. A lo largo de la construcción griega, los aparejos de las caras de este muro evolucionan desde la más rústica mampostería hasta el aparejo rectangular isodomo, pasando por los poligonales, trapezoidales, etc., pero en todo momento este tipo de muro obtiene la mayor difusión (fig. 3).

La construcción romana muestra las mismas prevenciones que tuvieron ya los griegos respecto al "emplecton". Vitrubio critica, en la época de Augusto, la apresurada versión romana de este tipo de muro: "Los nuestros, buscando la brevedad, levantan a plomo las dos caras del muro, cuidando sólo de lo exterior, y en el hueco central introducen toda suerte de ripio y fragmentos con mortero, sin orden alguno ni trabazón con las caras: de ello resultan, en estas obras, tres cuerpos u hojas de pared, dos en los frentes y otra en el relleno intermedio. Los griegos no proceden así, sino que colocando planas las hiladas de piedra y trabándolas unas con otras a lo largo de la "crasicie" (espesor) del muro, no dejan huecos sin llenar, antes bien, con unas piedras mirando a una cara y otras a la otra, componen todo el macizo de la pared; además de esto, colocan también algunos perpieños, llamados diátonos, con cara a los dos lados, que atraviesan toda la pared y abrazan sus dos paramentos. Con ellos atan maravillosamente la solidez de las paredes" (4).

Es evidente que los seiscientos años de "emplecton" anteriores a Vitrubio buscan la solución al problema de la solidaridad encomendando a las hojas exteriores la función portante y dan

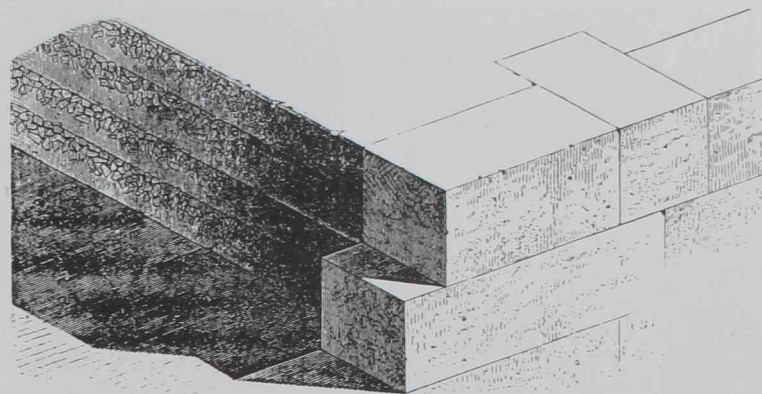
estabilidad al conjunto utilizando el núcleo más seco y duro y buscando su trabazón con las hojas exteriores. La difusión del "opus caementicium", que analizaremos más adelante, basado en las virtudes de la puzzolana como cemento hidráulico, da al núcleo unas cualidades portantes que el pragmático constructor romano no puede despreciar. Parece razonable suponer que ya desde Sila se reconoce el papel estructural del núcleo (5). El abandono de la tierra como aglomerante, el uso de morteros más fluidos y de áridos de dimensiones cada vez menores, junto con la reducción del espesor de las hojas exteriores, son consecuencia de este reconocimiento, pero implican, probablemente, la aparición de algún tipo de encofrado (fig. 4). En cualquier caso, queda demostrada la progresiva evolución de las relaciones entre las caras y el núcleo en busca de un comportamiento más solidario. La mayor retracción que supone la adopción del "opus cementicium" y el papel portante cada vez más claro que asume el núcleo, conducen a tallar los mampuestos de las caras en forma de pirámides de base cuadrada, de manera que los vértices de estas pirámides o "tessellae" se hincan en la pasta del núcleo (6). El papel de estas caras es cada vez más el de revestimiento, y su función decorativa lleva a regularizar las formas casuales del "opus incertum" (fig. 5), para adoptar la perfecta cuadrícula formada por las bases de las pirámides en el "opus reticulatum" (fig. 6 y 7).

La primera muestra de este nuevo aparejo se encuentra en el Teatro de Pompeyo del año 55 a.C. (7). Las dificultades que planteaba la importancia de la retracción del núcleo se solventaban, probablemente, gracias a la lenta ejecución, por tongadas, de las caras y el núcleo simultáneamente. Las "tessellae" fueron aumentando de tamaño con el tiempo, pasando de 5 a 12 cm de lado. Su éxito fue tal que, en algún caso, se moldearon en cerámica, quizá por no disponer de la piedra pómez adecuada. Es lo que sucede en algún muro de la "Granja de Horacio" (8).

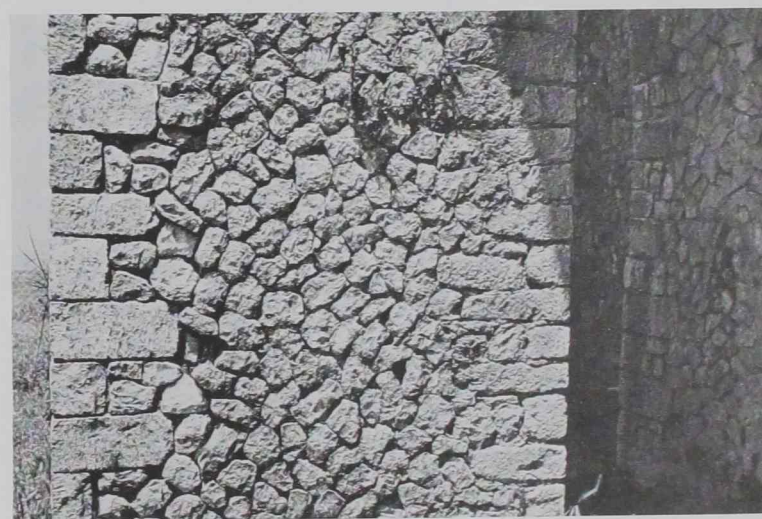
Durante la época imperial, el ladrillo sustituye a la piedra para incrementar la solidaridad entre las tres hojas del muro. Las piezas cuadradas se cortan diagonalmente para dar lugar a unos ladrillos triangulares que se disponen con su diagonal hacia el exterior y su ángulo recto clavado en el núcleo (fig. 8).

Su eficacia como encofrado perdido debía ser muy superior. Las juntas entre esas tongadas son identificables en algunos casos y llevan incluso astillas de mármol como conectores (9).

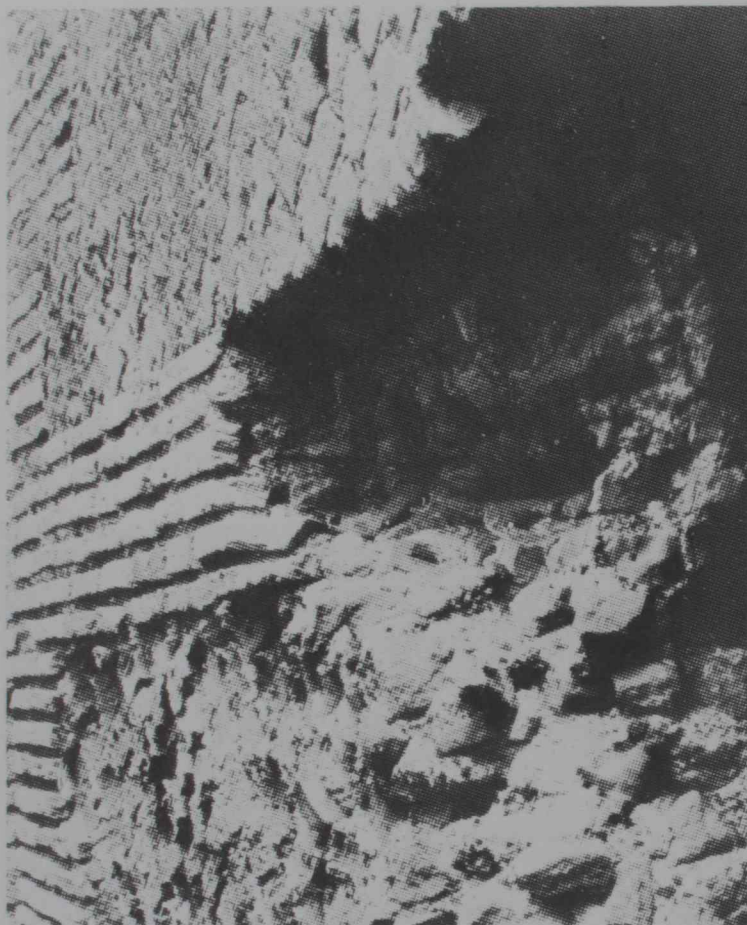
Estas notas evidencian que Roma tuvo la misma preocupación que Grecia por conseguir el comportamiento solidario del "emplecton", pero que el camino que adoptó para ello fue radicalmente opuesto debido al éxito del cemento de puzzolana. Mientras los griegos intentaron evitar las retracciones construyendo un núcleo más rígido que colaborase mejor con las caras portantes, entre los romanos se redujo el papel de las caras a un encofrado perdido que debía ser solidario, en la retracción, con el núcleo de hormigón, ya que éste asumía el papel portante.



4. Choisy defiende que los romanos sólo vertían auténtico hormigón y lo apisonaban cuando no era necesario encofrar el muro, como por ejemplo, en las cimentaciones o en los muros de hojas exteriores de sillera gruesa.



5. Cuando en Roma se descubren las propiedades hidráulicas de la puzzolana, la cante-ría de las hojas exteriores se hace más permeable al aglomerante y, con éste, se envuelve un aparejo cada vez más irregular. El "opus incertum" de este pilar del templo de Júpiter en Terracina es un ejemplo.



6. El límite en el traspaso de las propiedades portantes desde las hojas exteriores hacia el núcleo lo constituye el "opus reticulatum". La fotografía muestra en la parte superior el aspecto de cuadrícula girada que ofrecen las bases de las "tesserae". En la parte inferior se ve la poca profundidad de las mismas y su carácter de simple revestimiento de un núcleo aglomerado. Incluso las verdugadas de ladrillo de la parte central de la fotografía afectan sólo superficialmente este muro del puerto de Ostia.

El muro medieval

La caída en desuso del hormigón, que acompaña a la decadencia del imperio romano, supone la difusión de nuevo del muro de mampostería de dos caras con un relleno de calidad diversa. Como en otros aspectos, parecen olvidarse las exigencias clásicas y vuelve a iniciarse el ciclo de errores y aciertos para el diseño de un nuevo muro de tres hojas. Para recorrerlo brevemente seguiremos el texto de la famosa voz "Construction" del diccionario de Viollet le Duc, que en este tema parece no excederse en las hipótesis atractivas pero excesivamente simplistas que lo han desacreditado un tanto.

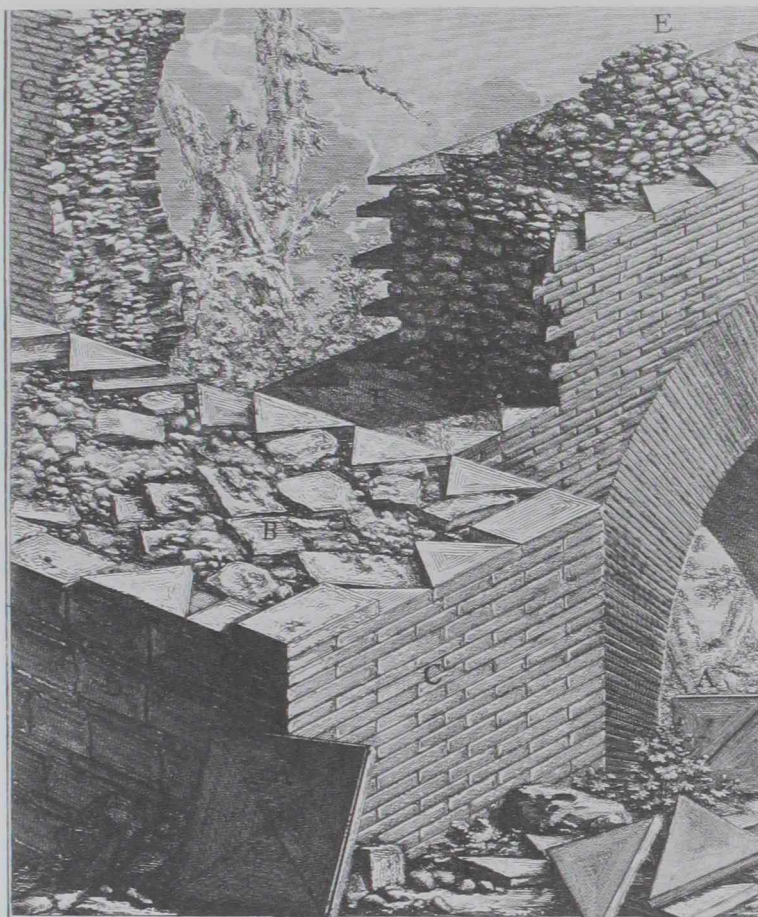
Así demostraremos no sólo la importancia histórica del tema de las retracciones en el medioevo, sino también el valor que le otorgó la arqueología decimonónica, valorando su



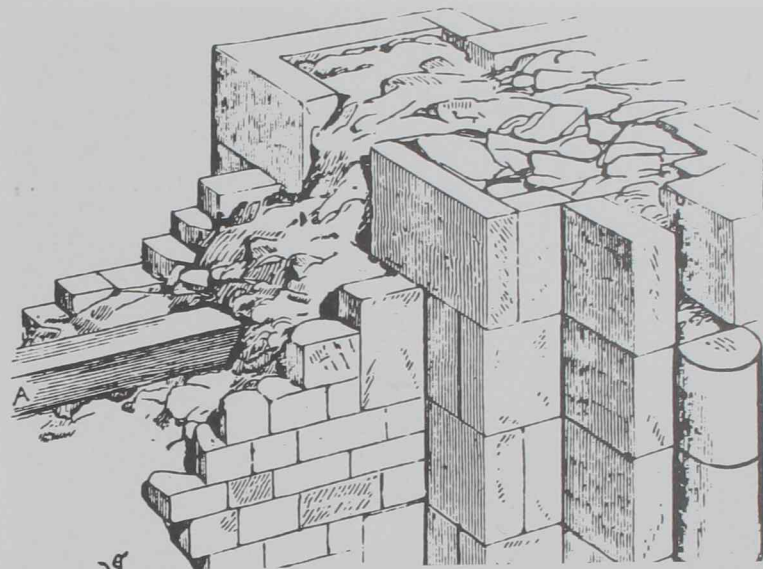
7. El virtuosismo a que llega Roma en estas formas de leve revestimiento del muro de hormigón lo evidencia este "opus reticulatum" de sorprendente dibujo policromo de un muro pompeyano.

permanencia como aspecto clave para la comprensión de la construcción y desacreditando su presentación como una novedad planteada por los materiales contemporáneos.

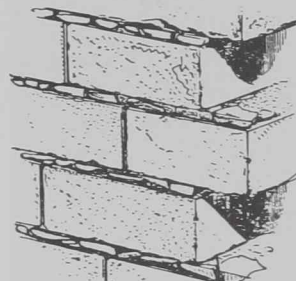
Cuando la construcción romana no puede mantenerse por la desaparición de la estructura social y económica que la hizo posible, los intentos por mantener la construcción maciza del "opus cementicium" que hizo el imperio carolingio van desapareciendo (10). Los monjes de Cluny difunden un nuevo tipo de muro para optimizar el uso de los recursos naturales más a mano: "la piedra se economiza todo lo posible, ninguna pieza presenta vaciados...", "para los muros rellenos, adoptan un pequeño aparejo de mampostería careada o de sillarejo para los paramentos, que encierran, como siempre, una masa de gravilla y mortero" (fig. IV/9). "No es más que un revestimiento, ejecutado, con todo, con el mayor cuidado; no sólo los paramentos están careados, sino también los lechos y las juntas verticales, las piedras se ponen a hueso, sin mortero, como en la sillería romana" (11). No es extraño que apareciesen en este sistema de construcción los defectos de solidaridad que hemos comentado ampliamente: "los pilares, formados por chapados de piedra que encerraban un relleno compuesto frecuentemente por mortero mediocre, y los muros, desligados en toda su altura, sufrieron los efectos de asentamientos desiguales que causaron desgarrs en las construcciones y, en consecuencia, graves accidentes " (12) (fig. 9).



8. El grabado de Piranesi interpreta la última forma del muro de tres hojas romano: el "opus latericium". El aspecto de sólida obra de fábrica queda desmentido por esta sección que evidencia el papel de revestimiento de este medio ladrillo triangular que se hincan en la masa aglomerada para asegurar la adherencia entre el núcleo y las hojas exteriores.



9. La construcción románica del muro de tres hojas es criticada por Viollet-le-Duc en este esquema. El núcleo aglomerado de pequeñas piezas no puede ser solidario con una fábrica de sillarejo que se hace sillaría maciza, colocada a hueso en los elementos más destacados.



10. El muro gótico soluciona el problema de la deformación diferencial utilizando una gruesa junta en la cantería que, según Viollet, permite que ambas fábricas, núcleo y caras, sufran asentos similares.



11. Esta fachada del "Convent dels Àngels", en Barcelona, ejemplifica el esquema de Viollet y el buen comportamiento de un muro de este tipo y de grandes dimensiones.

Defensor del muro gótico, Viollet cuenta que "es un término medio entre la construcción romana de gran aparejo y la de masas revestidas de ladrillo o mampostería. Al adoptar el pequeño aparejo en los grandes edificios, los constructores del siglo XII tenían demasiado buen sentido para no colocar esas hiladas bajas y poco profundas, con junta seca, como en ciertas construcciones románicas; por el contrario, separaron esas hiladas con tendeles y gruesas juntas de mortero (de 1 a 2 cm), a fin de que estos tendeles establecieran una relación entre el macizo interior y los paramentos. Este era el método romano, y es bueno. Se comprenderá que, si se colocan hiladas a hueso delante de un macizo de gravilla y mortero, por el hecho que el macizo se retrae por la desecación de los morteros bajo la carga, y las hiladas de piedra con junta seca no pueden disminuir de volumen, se declarará una ruptura vertical detrás del paramento, el cual no tardará en caerse (fig.

10). Pero si se ha tenido el cuidado de dejar un lecho de mortero grueso entre las hiladas de piedra, este lecho, soldado al núcleo, no sólo retendrá las hiladas de piedra, sino que además les permitirá sufrir un asiento equivalente al del relleno interior" (13) (fig. 11). "Hechos de mortero de cal grasa (esos tendeles) adquirirían consistencia lentamente y, esperando la perfecta solidificación, las construcciones tenían tiempo de asentarse, de sufrir incluso ciertas deformaciones, sin ocasionar roturas en la mampostería".

Nuevamente, como en el caso romano, el núcleo deformable se dilata para englobar unos paramentos que ahora no son de "tessellae" de 10 cm, sino de sillarejo algo mayor. Pero la interpretación de Viollet nos ofrece un muro gótico más próximo al "opus caementicium" que al núcleo progresivamente rígido



12. Las ventanas del ábside de la catedral de Jaca señalan un defecto común en las construcciones gótica y románica: el uso de elementos verticales de una sola pieza, sin juntas, los conduce a asumir una carga muy superior a la que reciben los elementos adyacentes, que tienen numerosas juntas y, por tanto, mayor capacidad de retracción.

de la construcción griega. Pero el arquitecto gótico y la interpretación de Viollet se contradicen, ya que, a partir del siglo XII, (14), se utilizan piezas de piedra verticales que no tienen su altura limitada por el lecho de la cantera, como las hiladas, sino que se tallan horizontalmente dentro de este lecho y se colocan verticalmente en la obra. Estas piezas, columnillas, nervios y arquivoltas, rigidizan algunos elementos que se desea que sean indeformables. La escasez y estrechez de sus juntas las convierten en elementos rígidos que asumen toda la carga, una carga para la que no están preparados. El caso más famoso que recoge la historia de la construcción referente a este tema es el del derrumbamiento parcial de la catedral de Beauvais.



13. La catedral de Beauvais es la más atrevida de las catedrales góticas francesas.

La catedral de Beauvais es la más atrevida de las catedrales góticas. Su popularidad se debe a la altura de sus bóvedas (48 m) (fig. 13), pero sobre todo a su colapso en 1284. La interpretación de las causas de dicho colapso ha despertado la curiosidad de muchos tratadistas, desde los comentarios de Viollet hasta los modernos análisis de Mark (15).

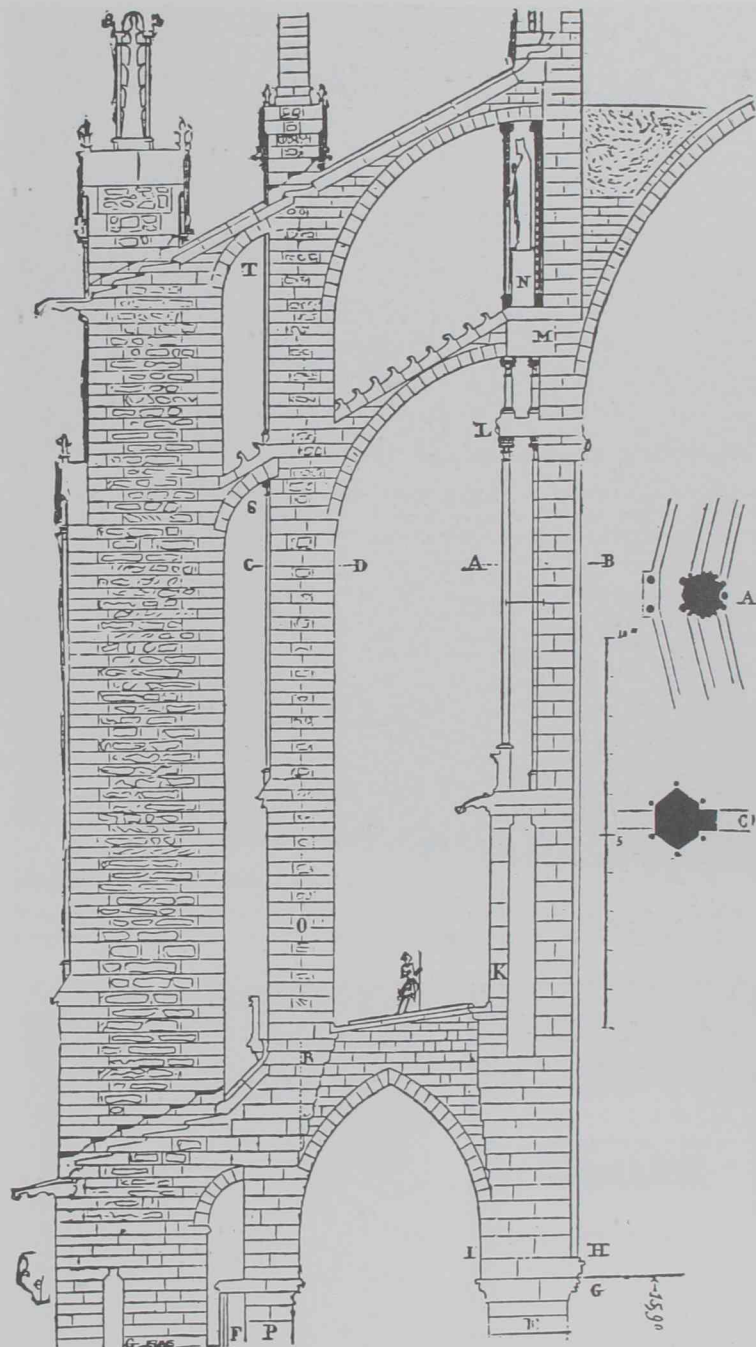
Viollet alaba el diseño general del edificio y analiza la composición de los elementos constructivos que permitieron que este edificio fuera el "non plus ultra" de las catedrales góticas, pero considera que la ejecución fue defectuosa: "este enorme edificio habría conservado su estabilidad si el arquitecto hubiera dispuesto las columnillas gemelas de encima



14. Su esbelta estructura de arbotantes y contrafuertes cedió, según Viollet, porque las esbeltas columnillas de una sola pieza produjeron desequilibrios en los arbotantes al descender los muros vecinos por la retracción de las juntas entre sillares.

del triforio más gruesas y más resistentes, si hubiera podido hacerlas de fundición, por ejemplo. Los desórdenes que se han manifestado en la construcción vienen todos de ahí; estas columnillas, demasiado frágiles, se han roto porque no podían resistir la carga que se les transmitió cuando los pilares interiores se asentaron por la desecación de los morteros" (Viollet. Dictionnaire. Tomo 4. Pág. 180) (fig. 14).

La caída de las columnillas arrastró la del dintel L y la del macizo M y, por tanto, la del contrafuerte que se apoya sobre él y la de toda la nave de la iglesia (fig. 15). En la parte del crucero que no llegó a caer y en la girola, las peligrosas columnillas fueron sustituidas por una torpe pilastra maciza durante el siglo XIV.



15. Este esquema de Viollet describe los elementos que, según sus hipótesis, produjeron la ruina de gran parte de la famosa catedral.



16. La prodigiosa artesanía de esta albañilería bizantina se apoya en el gran espesor de las juntas de mortero. Esta fábrica, especie de aglomerado de piezas cerámicas, sufre las consecuencias de la retracción del aglomerante.

Cierta o no cierta, la explicación de Viollet puede servir como muestra de la importancia atribuida históricamente a la retracción por pérdida de agua. Nuestra historia podría seguir con las propuestas de Serlio para evitar que los chapados rígidos tomen la carga de los muros; o con los avisos de Fray Lorenzo (16) a propósito de la torre de Comares que, un año después de construida, había bajado una vara; o con las diatribas de Rondelet contra los malos artífices de Santa Genoveva.

Pero es mejor dejar aquí la historia, conscientes de la prudencia con que la tradición ha tratado las consecuencias del descenso de cargas por retracción de masas húmedas. Tampoco insistiremos en otras formas tradicionales de prever el entumecimiento o los aumentos de volumen por ganancia de humedad, como las que Truñó adoptaba para el yeso de las "voltes" que tan bien enseña a construir (18).

Para prever hoy la amplitud y las consecuencias de estos movimientos, vamos a recorrer rápidamente los órdenes de magnitud que pueden alcanzar.

Cuantificación de los movimientos provocados por cambios de humedad

Deben distinguirse, en principio, dos tipos de movimientos netamente diferentes. Los irreversibles, que son consecuencia de los procesos de fabricación, y los reversibles, movimientos repetitivos, consecuencia de los procesos de humidificación o secado producidos por las variaciones meteorológicas u otras.

Tres son los grupos de materiales con deformaciones higrotérmicas de características irreversibles:

Los basados en los compuestos de cemento: morteros y hormigones. Empiezan su vida húmedos y se retraen al secarse (fig. 16). La norma EH-80 aconseja tomar unos valores mínimos de retracción de 0,25 mm/m, pero señala varias causas (ambiente seco, baja densidad de los áridos, coeficiente de forma de la pieza, etc.) que pueden incrementar este valor hasta 0,6 mm/m, según los comentarios y cálculos anexos a la norma (19). La BRS ha medido valores algo superiores: de 0,4 a 1 mm/m para los morteros y de 0,3 a 0,8 mm/m para los hormigones (20) (fig. 17).

Los productos cerámicos que, por su proceso de fabricación a altas temperaturas, llegan a la obra totalmente secos y aumentan de volumen, se entumecen, al aumentar su grado de humedad, ya sea debido a los procesos de puesta en obra ya a la misma humedad ambiente. Este proceso, cuyo funcionamiento químico es muy poco conocido, puede prolongarse durante algunos años; sin embargo su fase más activa se limita a los tres primeros meses. A pesar del desconocimiento de las causas y de la diversidad de resultados de las experiencias, parece haber cierto acuerdo al considerar, para el cálculo, valores de 1mm/m y aún superiores (1,2 según la BRS).

El yeso aumenta de volumen al hidratarse. Esta reacción, que se acaba prácticamente en el plazo de una hora, le lleva a incrementos de volumen de 1,5 a 3,5 mm/m. Inmediatamente

se inicia un proceso de secado y, consecuentemente, una retracción que reduce esa hinchazón a cifras de 0,2 a 1,5 mm/m (21).

Veamos ahora los movimientos reversibles, aquellos a los que está sometido el material durante toda su vida debido a los cambios de humedad. La normativa española del hormigón curiosamente no da ninguna orientación a este respecto, aunque cita este tipo de deformaciones. Los datos de otros países no coinciden exactamente en este caso, pues para la BRS serían de 0,2 a 0,6 mm/m para hormigones de grava, mientras que el CSTB da 0,25 mm/m para todos los hormigones pesados y 0,7 mm/m para los de vermiculita y perlita (22).

La cerámica es, también en este caso, el material más estable: 0,2 mm/m para la BRS. Las recomendaciones del CIB coinciden en valores del orden de 0,2 a 0,1 mm/m, aunque todas llaman la atención sobre los altísimos valores que estas cifras pueden alcanzar en otras piezas utilizadas en la construcción: desde 0,6 mm/m para el bloque de hormigón hasta 5 mm/m para el ladrillo sílico-calcáreo.

El yeso, para el CSTB, puede seguir teniendo peligrosos movimientos higrométricos durante toda su vida, pues sus variaciones dimensionales, en grados extremos de humedad, son de 1,5 a 2 mm/m (fig. 18).

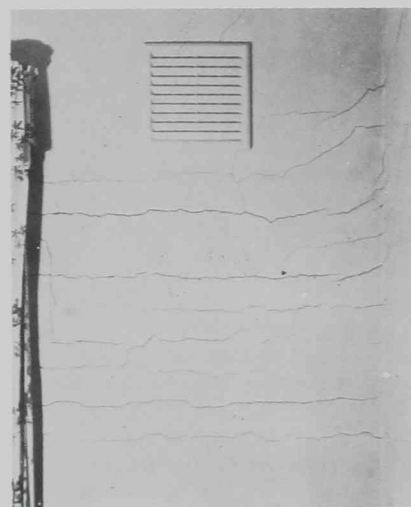
La madera, como es sabido, es el material más sensible a los cambios de humedad (fig. 19). Pero lo que la hace más peligrosa en este aspecto es la diversidad de sus coeficientes de deformación higrométrica, medidos formando diversos ángulos con sus anillos. Así, la deformación axial en el sentido de crecimiento del árbol apenas tiene valor, mientras que la tangencial a los anillos llega a alcanzar valores de 0,6 mm/m y por grado de humedad. Piénsese que, entre un clima cálido y húmedo de verano (25°C y 85% de humedad) y el microclima de un interior calefactado en invierno (22°C y 40% de humedad), la madera pasará del 19 al 8 o al 9% de humedad. Sólo queda, pues, multiplicar los 0,6 mm/m anteriores por estos diez grados de temperatura para obtener una deformación lineal que justifica la deformación de cualquier parquet mal colocado. Con razón decía Joaquim Bassegoda que en esto estribaba la mayor dificultad del trabajo del carpintero, en construir un conjunto invariable con piezas que varían sin cesar (23). Los valores habituales quedan entre 0,17 y 0,6 mm/m por grado de humedad para la deformación tangencial y entre 0,1 y 0,2 mm/m por grado para la deformación radial (24).

Aunque los movimientos diferenciales de origen higrométrico sean ligeramente inferiores a los de origen térmico, y sobre todo menos peligrosos porque, al ser más lentos, pueden ser asimilados mejor por el material gracias a su capacidad de fluencia, deben tomarse algunas precauciones particulares para cada elemento constructivo.

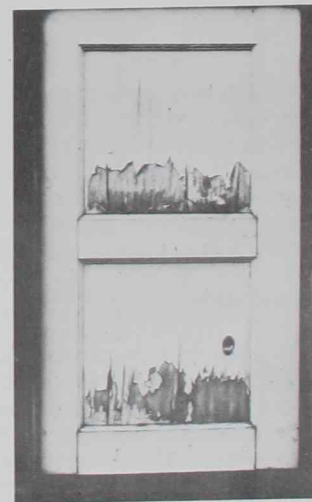
Las más simples y directas son las que afectan a los movimientos irreversibles, puesto que su incidencia en el proceso puede compensarse fácilmente, ya que es bien conocido, aunque sea simplemente secando bien los yesos



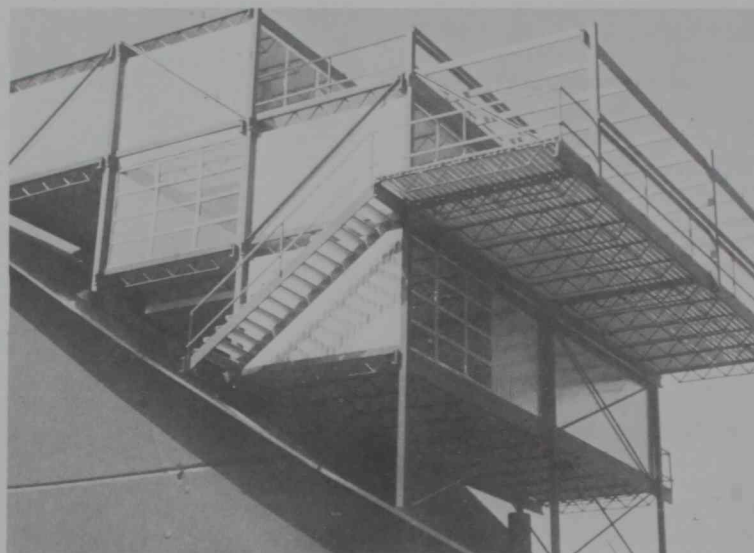
17. La retracción es una de las muchas razones que recomienda proscribir el mortero de cemento en la cosmética de las restauraciones. Templo dórico de Silene, en Sicilia.



18. Una defectuosa aplicación del yeso puede llevar a espectaculares retracciones.



19. Esta puerta de madera, por el contrario, ha sufrido un importante emtumeamiento sobre todo en los paneles de contrachapado.



1. La construcción, hoy, dispone de un abanico amplísimo de materiales especializados, cada uno de ellos, en cumplir un papel en el edificio. Los elementos portantes de acero, los aislamientos de plásticos espumados, la impermeabilización con láminas asfálticas, las protecciones externas de amianto-cemento e internas de placas de cartón-yeso, etc. dan lugar a edificios como éste. Es una combinatoria de elementos dentro del sistema TEST californiano y un ejemplo más de la construcción que podemos llamar heterogénea.

prefabricados y mojandó abundantemente las cerámicas. Pero el consejo más tradicional y valioso es el de no utilizar los materiales inmediatamente después de su extracción o fabricación. Blachère nos hablaba de tres meses para eliminar el riesgo de las deformaciones más importantes. Alberti cita a Catón: "La piedra sácala en el estío, y tenla al descubierto, y antes de dos años no la pongas en la obra..." (25).

Conclusión

Los problemas de durabilidad provocados por los movimientos diferenciales no han hecho más que aumentar, impulsados por la progresiva heterogeneización de la construcción, desde que Alberti los identificó (fig. 1). Primero fue el traspaso de los límites geográficos locales en el transporte de los materiales naturales; después los materiales estructurales más o menos artificiales como el hormigón y el acero; hoy, la increíble proliferación de nuevos materiales industriales.

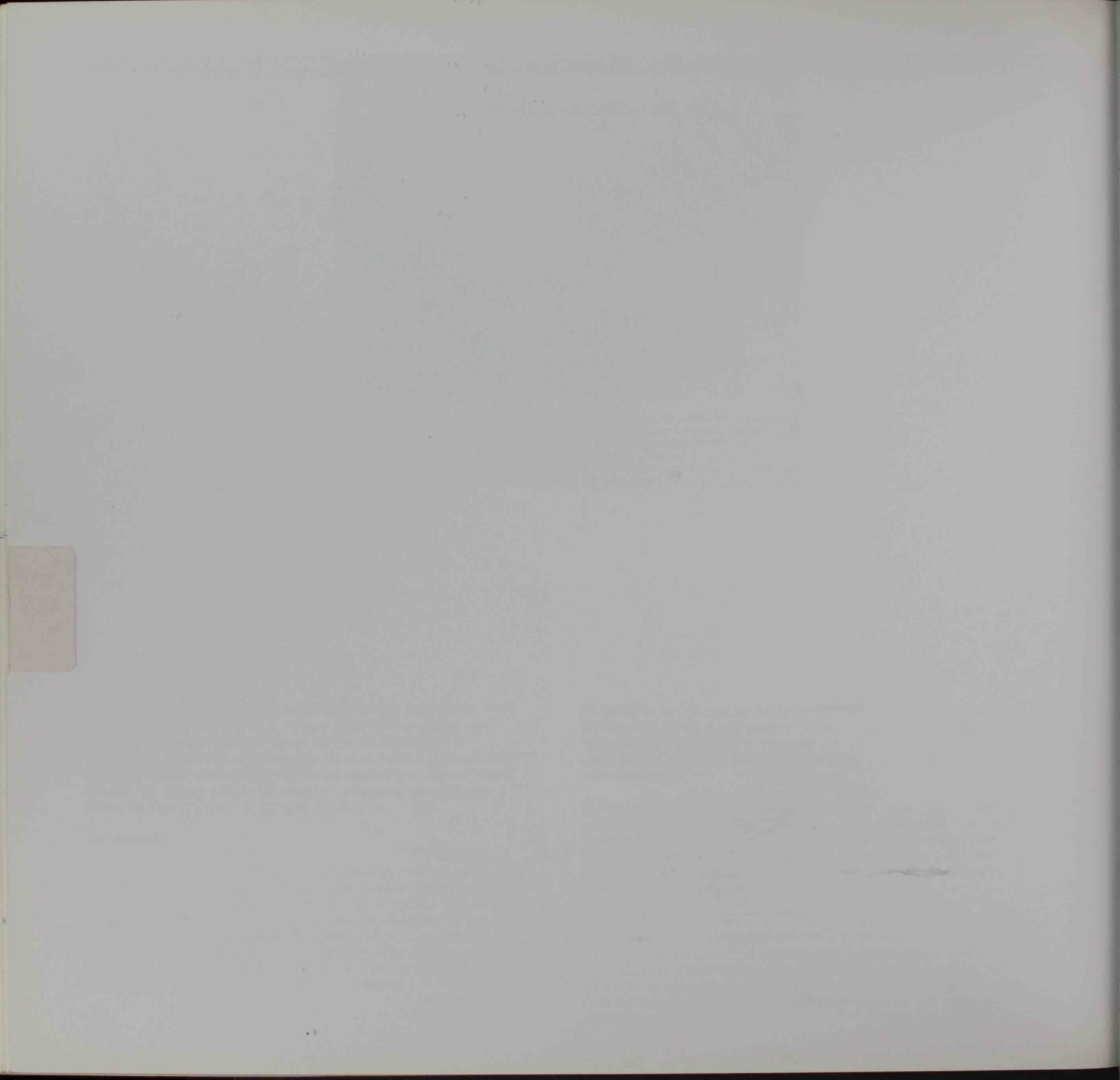
El tamaño de las piezas se hace, también, cada día mayor (véase Apéndice) y, consecuentemente, se reduce el número de uniones y aumenta la importancia de las deformaciones de cada pieza, que son siempre proporcionales a sus dimensiones.

La importancia de esas deformaciones las hace incoercibles y es necesario poner a punto nuevos sistemas de unión que las permitan. La construcción empieza ahora a adecuarse a las consecuencias de esta progresiva heterogeneidad y hoy no dispone, como disponía, de un código completo de recetas para cada situación problemática.

Ahora más que nunca, la sentencia de Alberti tiene importancia y, curiosamente, encuentra eco en las declaraciones de los expertos tecnólogos: "La fiabilidad de los actuales sistemas tecnológicos constructivos tiende continuamente a reducirse respecto al pasado... puesto que el sistema mismo tiende a ser más complejo a causa de la heterogeneidad de los materiales utilizados..." (1).

Segunda parte

Las técnicas de puesta en obra





1. 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, formáceos.

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 construcción tienen como objetivo fundamental esa conformación y ese ensamblaje y deben 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

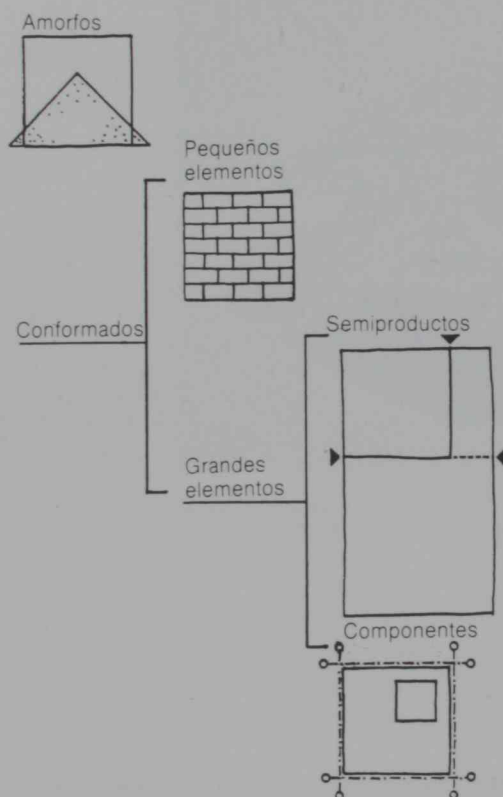
La materialidad de la arquitectura se elabora a partir de numerosos tipos de materiales que se someten a diversas manipulaciones para dar al edificio la calidad funcional y formal exigida. **Todos los materiales sufren hoy algún tipo de**

manipulación más o menos compleja antes de llegar a la obra donde llegan como productos semielaborados. En este texto no hablaremos de estas modificaciones previas, sino específicamente de las técnicas que se utilizan para levantar un edificio con estos materiales más o menos elaborados.

El proceso de construcción exige una manipulación física de los materiales para que vayan conformando el edificio y adopten una forma concreta en un lugar específico del edificio, donde cumplirán la función que se les encomienda.

Esta manipulación física, 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, el relleno del pilar está muy próximo a cualquier relleno con hormigón y las normas de la albañilería que requiere la colocación del ladrillo serán las mismas que regirán la construcción de un muro portante, incluso en el caso que éste se construya con bloques de hormigón.



2. Tipificación 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.

La forma de los materiales

La primera característica a considerar es, precisamente, la presentación concreta y definida que tiene el material que llega a una obra. Muchos materiales, tradicionales y modernos, han llegado a la obra como polvos, líquidos, pastas, etc., sin forma definida. Atendiendo a ello, podemos llamarlos **amorfos** o, más correctamente, **no conformados**.



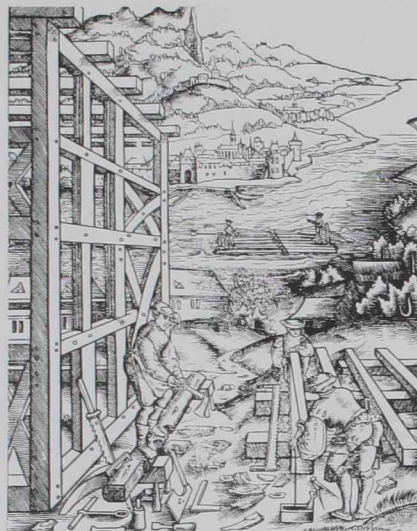
3. Esta obra de los SITE Indeterminate Façade, para un Shopping Center en Houston es toda una exhibición de las posibilidades del ladrillo y un ejemplo paradigmático de los pequeños elementos. La pérdida de su identidad en la fábrica de albañilería se recupera aquí espectacularmente en este cuidado derrumbe.

Casinello califica el hormigón, el más importante de los materiales de este grupo, con el adjetivo "formáceo", que tiene la ventaja de añadir, a la carencia de forma, la connotación de su "capacidad de ser conformado" (fig. 1). **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.**

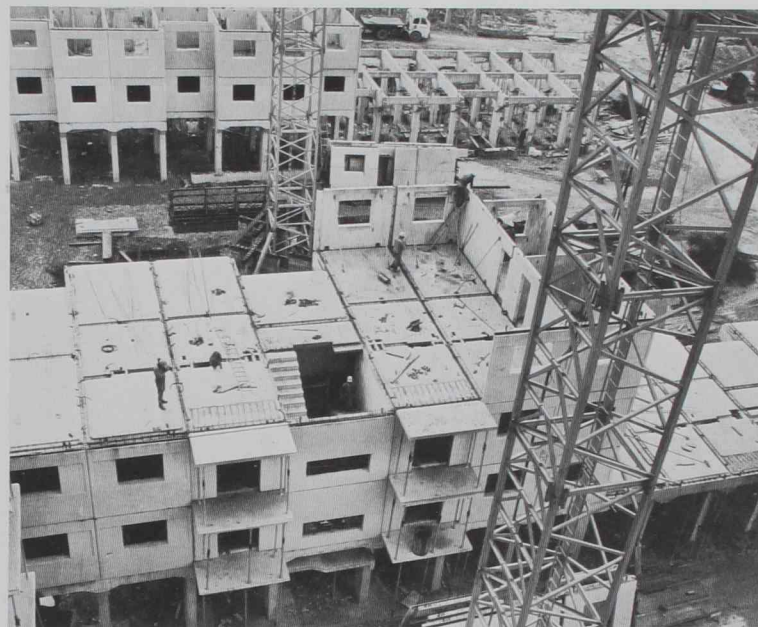
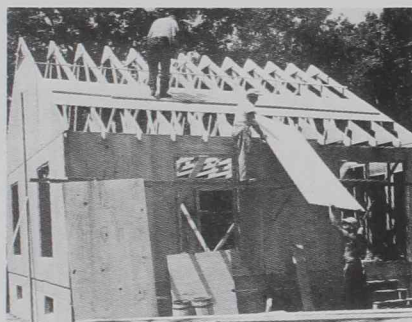
Todos los demás materiales, los que presentan una forma definida al llegar a la obra, serán los conformados. Consideraremos conformados tanto el **ladrillo como la placa de fibrocemento, tanto el perfil metálico como la pieza sanitaria.**

El tamaño de los materiales

Entre los materiales conformados, el tamaño establece la diferencia fundamental. De un ladrillo a un panel prefabricado,



4. El grabado del s. XVI recorre todo el proceso tradicional de transformación de un material natural, la madera: la llegada de la pieza al tajo con su forma natural y sus diversas conformaciones por corte hasta adoptar la forma exacta del elemento constructivo exigido.



6. Las construcciones con grandes paneles, como esta 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 que, si en este caso es espectacular, no se diferencia esencialmente del habitual de una bañera, ventana, etc.

5. La construcción de una casa americana con tableros de madera aglomerada o contrachapada ofrece el paralelo contemporáneo de los materiales naturales y es un ejemplo de lo que hoy llamamos semiproductos. La forma del material al llegar a la obra es resultado de un proceso industrial que sustituye al natural, pero una vez allí, sufre también procesos de conformación antes de adoptar su forma definitiva de hastial, antepecho, etc.

la diferencia fundamental de técnica de aplicación se establece a partir de la diferencia de tamaño.

Es difícil establecer un umbral preciso de diferenciación, pero puede intentarse a partir de las siguientes consideraciones. Muchos materiales, y en particular los tradicionales, se diseñaron para ser fácilmente manipulados por el hombre. El prototipo es el ladrillo, que debe poder ser manejado con una sola mano, pero a su misma escala existe el adoquín, la teja, el bloque, la bovedilla, las losetas cerámicas, las baldosas, etc.

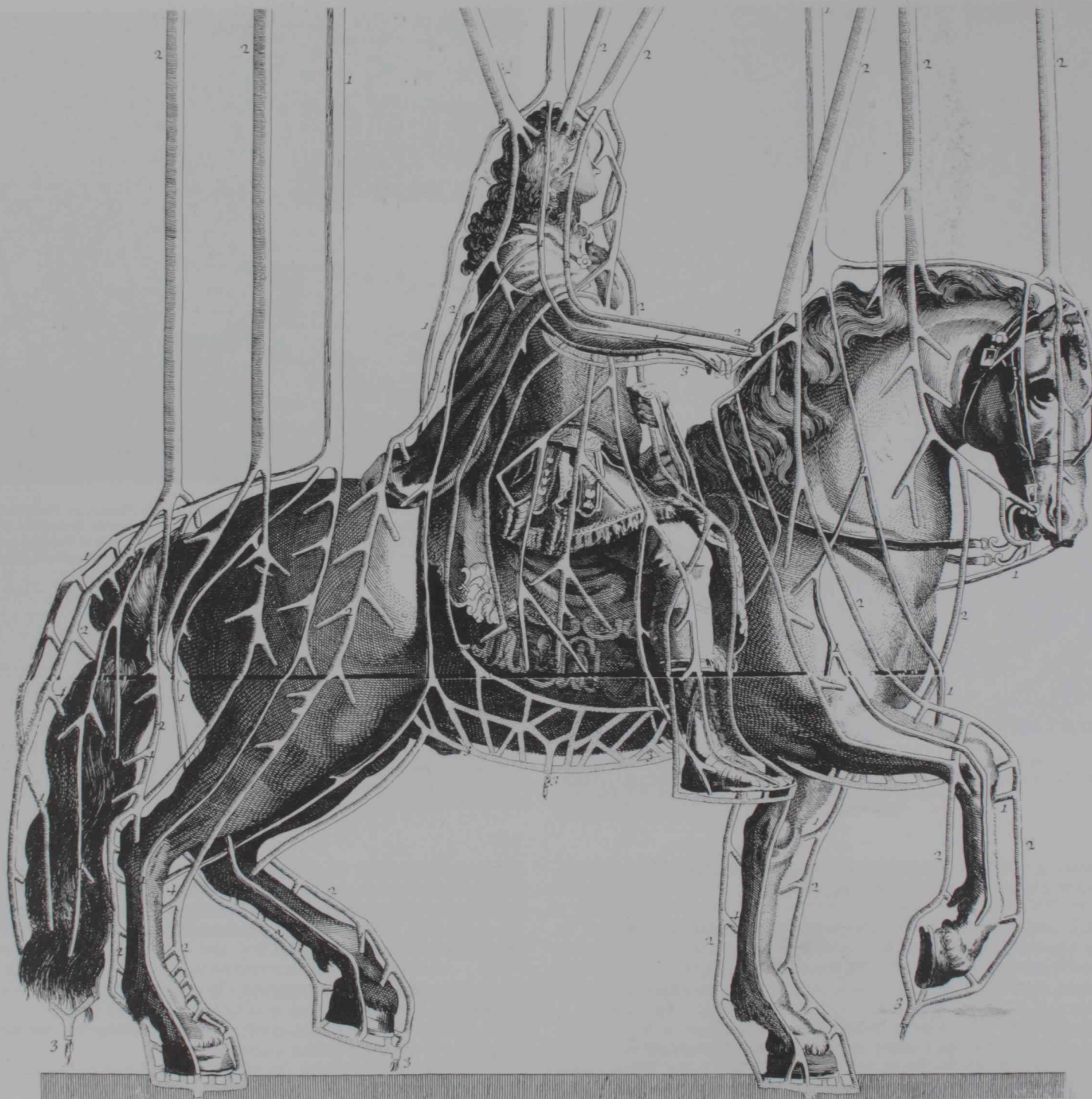
Es necesario reunir muchas unidades de estos materiales para formar un paramento cuyas juntas siempre plantean complejos problemas (fig. 3). Frente a ellos están los materiales que se diseñaron a escala de un paramento aunque no tengan exactamente sus dimensiones. Un paramento de un local normal estará, pues, formado por una sola o pocas unidades

de estos materiales. El ejemplo prototípico son los paneles prefabricados de hormigón, pero también se incluyen en este capítulo las chapas metálicas, las moquetas, el cartón-yeso, y por extensión, los perfiles metálicos, las jácenas o los pilares prefabricados de hormigón.

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

La conformabilidad

Algunos materiales conformados pueden sufrir todavía algún proceso de transformación en obra para adaptarse a la forma del lugar que deben ocupar en el edificio. Este tipo de proceso era muy importante en la construcción tradicional, pues es el



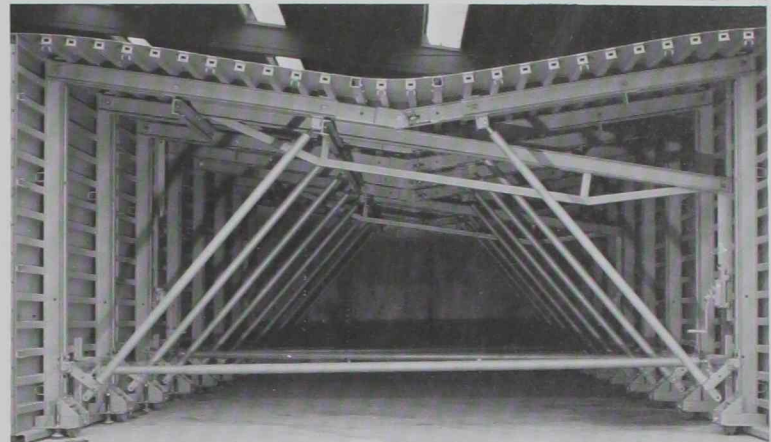
7. Los materiales amorfos sufren en obra un proceso de conformación. Por fraguados hidráulicos, por cambios de temperatura o por otros procesos, los materiales toman la forma deseada. Es fundamental que la velocidad de endurecimiento se adecue al tipo de puesta en obra. Ésta es una exigencia general en los procesos de conformación de los materiales amorfos y, por tanto, es válida para el moldeado. Su importancia se extiende a los moldeados en fábrica y en obra. Esta lámina de la "Encyclopédie" de Diderot es un magnífico ejemplo de moldeado en 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.



8. 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.



9. 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.



10. 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.

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 (fig. 4).

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 los azulejos o las baldosas de terrazo.

No son éstos los materiales que nos interesan, sino aquellos que, siendo grandes conformados, se adecuan por corte a la dimensión exacta del edificio. En la construcción actual forman un capítulo en vertiginosa expansión y gozan de las ventajas de la producción industrial sin condicionar las dimensiones del edificio. Son los llamados semiproductos, cuyos ejemplos más claros son el tablero de aglomerado de viruta, el cartón-yeso, la tela asfáltica, las placas rígidas de aislantes térmicos, los pavimentos vinílicos, etc. (fig. 5).

Los otros grandes conformados, los que no pueden seguir un segundo proceso de conformación en obra, forman el grupo de los componentes, y sus ejemplos más claros son el gran panel de hormigón y la gran pieza sanitaria, que no podrán cortarse para adecuarse a las dimensiones de su hueco (fig. 6).

Las técnicas de transformación y la forma de los materiales

La clasificación expuesta en las páginas anteriores nos será útil para estructurar las técnicas que se aplican a los diversos tipos de materiales. En los próximos capítulos nos limitaremos a estudiar la técnicas de puesta en obra y sólo al final tendremos también presentes las de los movimientos de materiales.

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 formáceos reciben, en la obra y exactamente en el lugar que siempre ocuparán, su forma primera y definitiva. La técnica que se utiliza 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, diferenciará las técnicas de "moldeo" de las de "aplicación". En efecto, cualquier material amorfo necesita un soporte para su conformación. Si el material llena ese soporte envolvente y adopta la forma del recipiente, hablaremos de técnicas de moldeo (fig. 7); 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, entonces hablaremos de técnicas de aplicación (fig. 8).

Las técnicas de aplicación

Con estas técnicas se aplica una 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 tendido de morteros y yesos, y más superficialmente la moderna proyección 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 de que en su ejercicio se basa alguno de los oficios más



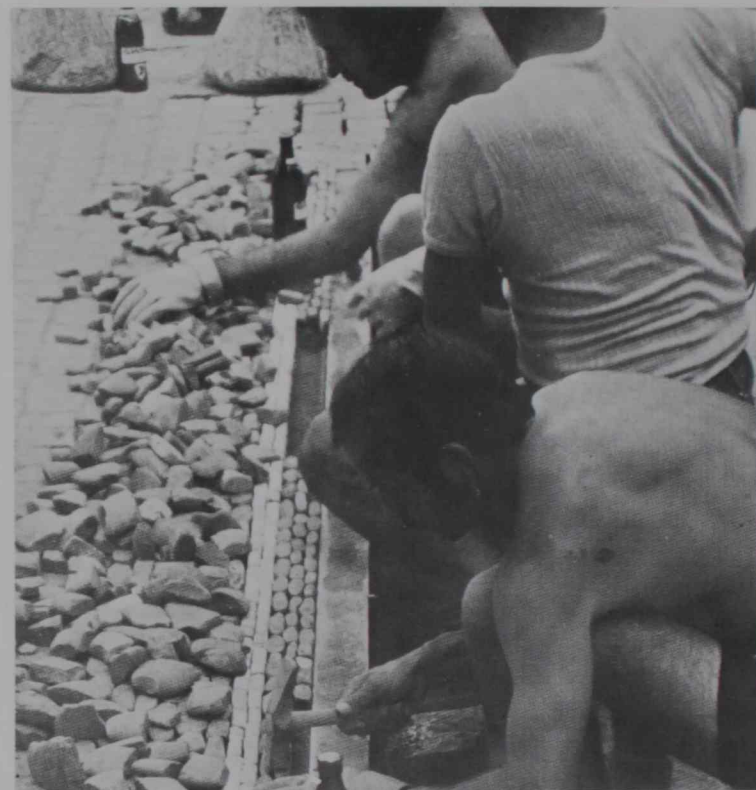
11. Los pequeños elementos se "adicionan" para formar elementos constructivos de mayor tamaño. La técnica más tradicional es la albanilería. La tradición artesana en el uso de pequeños elementos es vastísima. Estos alarifes tunecinos están construyendo una cáscara elíptica gracias al cordel atado a la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

tradicionales y de más irreductible supervivencia dentro de la construcción: el yesero, el estucador; y, por otro lado, alguno de los nuevos oficios que está consiguiendo la recalificación del trabajador de la construcción: el proyectador de hormigones, yesos o materiales de aislamiento.

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 son clara muestra algunas técnicas contemporáneas como el encofrado deslizante y el túnel (fig. 10).

Las increíbles posibilidades del moldeo explican la longevidad de una técnica que tanto repugna a la tecnofilia contemporánea. El moldeo permite que un material se adecúe 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.



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

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.

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, se fragua, a partir de un momento, y la adición de agua en los aglomerados y el tiempo de todo el proceso quedan ya absolutamente determinados. 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 ya cortados a pie de obra o componentes, son fáciles de manipular, pero deben incorporarse de manera solidaria al conjunto del edificio.

Para establecer una clasificación lógica de las técnicas de



14. 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 que cada componente conserva cierta individualidad dentro del nuevo elemento constructivo.

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 conservando cada elemento sus propias características, hablaremos de técnicas de fijación.

La adición reúne el conjunto de técnicas más características de la construcción, entre las cuales se cuentan la albañilería y la cantería. Es evidente que, para conseguir el monolitismo y la perfección formal de un muro o de una bóveda por adición absolutamente solidaria de piezas tan pequeñas como el ladrillo, es necesario el más alto nivel de saber artesano (fig. 11).

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 definitiva: la reversibilidad más o menos clara 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 es prácticamente imposible.

Forma del
material

Técnicas
volumétricas superficiales

Forma del material	conformación	Técnicas volumétricas superficiales	
		moldeado	tendido proyectado
conformados	adición	con aglomerantes hidráulicos	albañilería paneles grandes
		sin aglomerantes no hidráulicos	encolado soldadura
	fijación	con clavos con tornillos con tacos con inserciones	chapado

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

A. La adición mediante aglomerantes hidráulicos

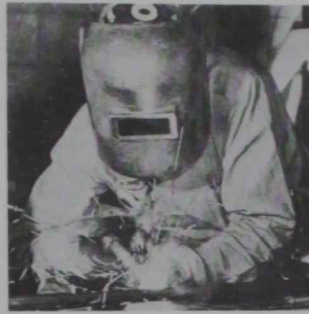
En general, las técnicas de adición tradicionales, y hoy todavía en uso, basan la adición en la interposición de aglomerantes hidráulicos. La retracción, los problemas de transmisión de cargas que veremos más adelante y la desaparición de conocimientos del albañil reducen, hoy, cada vez más, el campo de aplicación de la adición de pequeños elementos (fig. 12).

Siguiendo el esquema aplicado a las técnicas de los materiales amorfos, distinguiremos, también aquí, los tratamientos de revestimiento superficial de las técnicas que permiten formar elementos autoportantes de mayor volumen.

En el primer grupo hay técnicas muy elaboradas, como las de enlosado y embaldosado y, en general, casi todas las que revisten superficies con pequeños elementos.

B. 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 epoxi, y dando lugar a nuevos materiales, como la madera laminada y encolada, que aquí sólo podremos apuntar.



13. La soldadura es otra de las técnicas no reversibles de puesta en obra y la que puede llegar a garantizar una mayor continuidad en la estructura del nuevo elemento constructivo.

Por otra parte, los materiales metálicos se unen solidariamente mediante sistemas de soldadura que forman un conjunto específico dentro de las técnicas de adición (fig. 13).

C. La fijación

Esa expropiación del saber obrero, que intenta desplazar al artesano de la construcción, y la exigencia de la sociedad contemporánea, al introducir técnicas que pueden ser aprendidas rápidamente, se suman a la progresiva heterogeneidad de los materiales que conduce a sustituir progresivamente la adición por la fijación. Los nuevos modelos y sistemas de clavos, tacos de expansión, tornillos, pistolas de clavar, "inserts", etc. forman un conjunto de técnicas cada vez más utilizadas 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 (fig 14). Es el caso del fibrocemento, el cartón-yeso, las chapas metálicas, etc. Pero esta situación no es exclusivamente moderna: es plenamente tradicional el clavado de la pizarra.

A pesar de que la característica fundamental que diferencia la adición de la fijación es la pérdida de la individualidad de cada pieza, en el caso de la segunda también puede añadirse otra característica: la reversibilidad, más o menos clara de todas las técnicas de fijación.

Aspectos fundamentales de las técnicas de ejecución

Los próximos capítulos recorrerán las 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 a cuidar en un moldeo

dependerán probablemente del proceso de fraguado, mientras que en la albañilería parece que será la trabazón el objetivo más importante a cuidar durante la ejecución. 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.

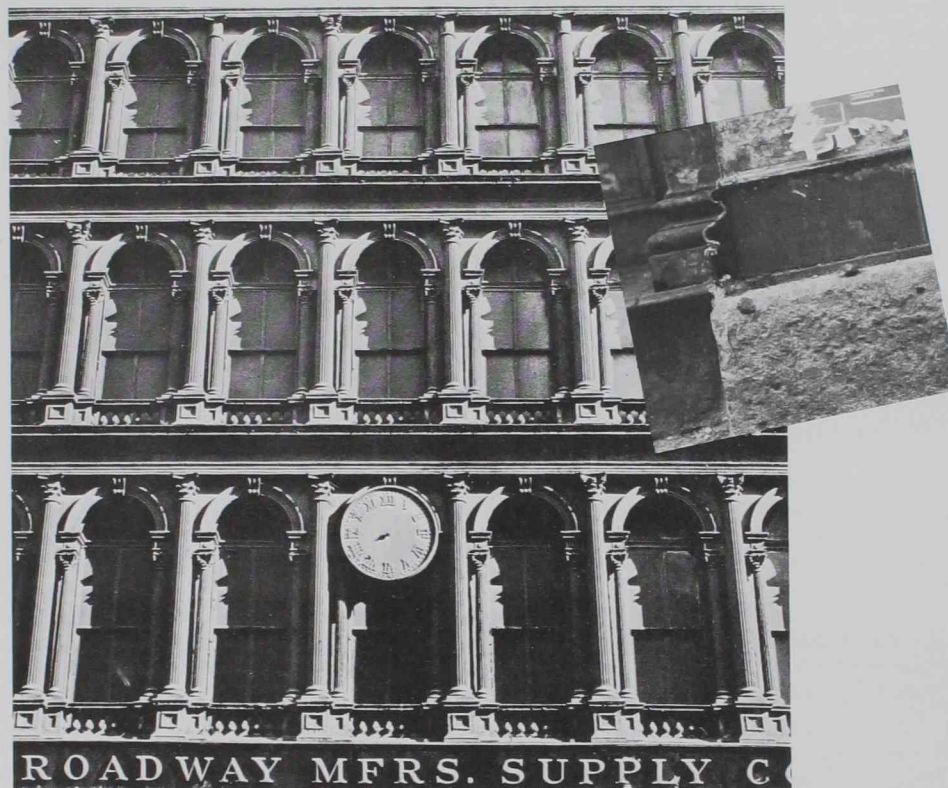
Por fin, cada grupo de técnicas se ejemplificará con la descripción precisa del proceso de ejecución y control de la técnica más representativa de cada grupo. Así, el moldeo se ejemplificará con la puesta en obra del hormigón; el tendido, con la aplicación de morteros de cemento; la albañilería, con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

Para ordenar el recorrido de las exigencias o cuidados que deben llevarse a cabo en cada técnica, supondremos que pueden clasificarse en tres grupos determinados, generalizables a todas las técnicas.

Unas exigencias dependerán de las características del material y cuidarán que su composición sea la deseada y cómo conseguir (según su forma) que el comportamiento de la construcción sea solidario.

Otras exigencias dependerán de las características del proceso de puesta en obra y garantizarán que este proceso se realice correctamente o que su evolución no perjudique los materiales implicados. Por fin, el tercero y último grupo de exigencias dependerá de las características del elemento constructivo en el 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 que hemos establecido, iniciaremos el estudio de los principales grupos de técnicas constructivas establecidos en los puntos anteriores.



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.

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

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

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.

La importancia del primer aspecto es evidente: una arcilla especialmente granulosa, por ejemplo, no dará lugar al

producto 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", dice 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 que 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.

La cohesión

Pero el problema fundamental es que esa estructura concrecionada, como la llama Cardellach, alcance la necesaria cohesión, es decir, una cierta resistencia a las tracciones lo más anisótropa posible. En la tapia real, eso se consigue añadiendo cal como aglomerante (fig. 3) (3) y, en muchos casos, armando la arcilla con cortos fragmentos de paja (fig. 4).

La conformación de la arcilla es de antiquísima tradición en España y es posible que aquí la aprendieran los romanos (4), quienes llevaron la técnica de moldeado a su máxima perfección. En sus obras más antiguas, se encuentran tapiales con adición de gravilla de diversos tamaños, como se hacía ya en Oriente, pero en el siglo III a.C. empezaron a sustituir la arcilla por cal (5). Bajo Sila, Roma construye, con hormigón de cal, bóvedas de 10 m de luz, como las que cubren el Tabularium.

Pero es con 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 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 hidraulicidad y resistencia ha dado universal fama de solidez a las construcciones de Roma" (6).

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 los primeros encofrados se usaron en zócalos, rellenos y cimentaciones, donde su presión hidrostática quedaba contenida por las tierras o por gruesas hojas de sillería.

Según Choisy, la compacidad de la mezcla, tan necesaria para su cohesión, se conseguía apisonando una mezcla de pasta y áridos hecha "in situ" (7). Cuando su uso se extrapola a situaciones tan arriesgadas como las bóvedas del Tabularium, debió ser necesario elaborar solidísimos encofrados y cimbras, capaces de soportar tanto peso y tanto apisonado.

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 (8) (fig. 5). La moderna arqueología da así la razón a Choisy, quién, 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. Choisy justifica esta construcción por la menor presión hidrostática de esa mampostería orientada y porque,

además, hace innecesario el apisonado (9). Puede así ahorrarse 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, tan próxima a la de nuestros clientes de hoy, justifica una evolución que, como veremos, es paralela a la que están sufriendo los encofrados actualmente (véase apéndice final).

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 (10).

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 cuales el simple hormigón era tan frágil. El aglomerante suele ser un cemento de los permitidos por la norma (11). Pero debe pensarse que esta lista no puede considerarse cerrada. Apenas estamos acabando de conocer el comportamiento de los cementos con adiciones activas, que todavía utilizamos como cementos portland normales, cuando se nos imponen los hormigones con cenizas y empiezan a estudiarse los hormigones endurecidos con polímeros, que ya han tenido amplio éxito en el laboratorio.

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 se han realizado con éxito ensayos de hormigones armados con fibras de acero y de polipropileno, que dan una resistencia sorprendente.

Recordemos, además, la amplia gama de aditivos que el hormigón admite, y tendremos que aceptar que, bajo la palabra hormigón armado, puede esconderse una amplísima 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.

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:

1. Exigencias planteadas por las características del material.

El hormigón es, por definición, un material compuesto y la garantía de que ese compuesto sea exactamente el deseado debe establecerse lo más exhaustivamente posible. Por ello deben comprobarse 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 disgregación que modifique la granulometría en alguna zona del material, las pérdidas de lechada, etc. (fig. 6).

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 fraguado (12). La presencia de burbujas de aire dará lugar a un material frágil, y debe evitarse aplicando métodos de apisonado, o más modernamente, de vibrado (fig. 7 y 8). 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 en fraguado (Exigencia II).

2. Exigencias que dependen del proceso de puesta en obra.

El moldeado se basa en el cambio de un material amorfo en 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 debe ser 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 entre sí. Si la arcilla está todavía demasiado líquida, se escapará entre los dedos del niño, si el hormigón está ya demasiado seco, obstruirá el conducto de bombeo. Es necesaria, pues, la adecuación de la puesta en obra a la velocidad de cambio de la plasticidad (Exigencia III).



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 elevada consistencia.



3. Este curioso tapial del Convent dels Àngels, en Barcelona, muestra una verdegada de cal cada 15 ó 20 cm.

La normativa es muy explícita a este respecto: "se utilizarán los procedimientos adecuados para que las masas lleguen al lugar de su colocación sin experimentar variación sensible de las características que poseían recién amasadas..." (13). 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 de curado y desencofrado, que deben adecuarse con precisión a las características físicas del hormigón en cada momento.

3. Exigencias que dependen del elemento constructivo a elaborar.

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. 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 grandes vacíos en el moldeado es el mayor problema de los encofrados perdidos, ya que, por no poder comprobarse el macizado, se crea una grave desconfianza de los elementos portantes.

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

La puesta en obra del hormigón armado

Seguiremos el proceso de puesta en obra citando los aspectos fundamentales y relacionándolos con las exigencias fundamentales por medio de los números romanos entre paréntesis.

La Recepción

En el momento en que el hormigón se recibe en la obra, se debe conocer en qué momento del proceso de fraguado se encuentra (III) y controlar, como ya se ha indicado, que sus características son las solicitadas (I). Para lo primero, se debe comprobar en la factura que acompaña la carga la hora en que fue cargado el camión y el tiempo límite de utilización del hormigón.

Para controlar los aspectos de la segunda exigencia, la misma factura debe especificar la designación del hormigón, dejando constancia de su resistencia característica, consistencia y tamaño límite del árido. Pero, además, como veíamos, para un control directo de esas características, debe efectuarse una toma de muestras que permitirá, como mínimo, la ejecución de una prueba de determinación de la consistencia (asiento en el cono de Abrams) y la confección de las probetas necesarias para el ensayo de la resistencia mecánica.

Será necesario también controlar y aceptar la ejecución del molde y la disposición de las armaduras. Este importantísimo aspecto de la técnica del moldeado está afectado por dos de las exigencias fundamentales que señalábamos.

Efectivamente, está afectado por la primera exigencia, ya que un molde mal ejecutado puede variar la composición del hormigón o su homogeneidad. Por ello es necesario que el molde sea

absolutamente estanco para evitar las pérdidas de lechada, debe estar humedecido, si es de un material absorbente, para evitar las pérdidas de agua, las armaduras deben estar correctamente dispuestas para permitir el hormigonado sin provocar desagregaciones (paso del árido entre armaduras, entre éstas y los paramentos y posibilidad de compactación).

Para satisfacer la cuarta exigencia, es evidente el papel protagonista que cumple el encofrado. Es necesario comprobar que su situación y sus dimensiones son las previstas, pero sobre todo es necesario asegurarse que todo él y las uniones entre piezas poseen una resistencia y una rigidez suficientes como para soportar, sin deformaciones perjudiciales, las acciones que puedan ejercerse sobre ellos como consecuencia del proceso de hormigonado. Además, para evitar defectos o desperfectos de aspecto, los moldes se deberán limpiar cuidadosamente y recubrirse con desencofrante.

Para garantizar el cumplimiento de la primera exigencia en lo que podríamos llamar forma interna del hormigón, se deberá controlar que la posición de las armaduras, limpias de grasa o pintura, sea exactamente la prevista en el proyecto y que esta situación no se alterará durante las operaciones de vertido o vibrado, por lo cual deben atarse entre sí y al encofrado.

Transporte

Durante el transporte del hormigón en el interior de la obra hasta el punto donde será vertido en su encofrado, debe tenerse en cuenta la exigencia general de todos los materiales formáneos (III), que en este caso nos obligará a cuidar que el fraguado no se inicie antes de llegar la pasta al molde. Pero el mayor peligro de esta operación estriba en las limitaciones que impone la condición de homogeneidad de la composición interna (III) a un transporte continuo y rápido. En efecto, el peligro de desagregación de los componentes e incluso el de la pérdida de lechada son mayores cuanto más eficaz es el sistema de transporte.

En el sistema más antiguo, de acarreo en cubos, carretillas y vagonetas, los peligros de desagregación son mínimos, pero tiene las limitaciones de todo transporte discontinuo, que sólo puede aumentar su eficacia incrementando desmesuradamente el tamaño del contenedor: de ahí los gigantescos cubilotes actuales.

El sistema continuo más simple, el canalizado que utiliza la gravedad, ofrece ya graves peligros de desagregación, y por ello la pendiente debe limitarse a 15°. El bombeo utiliza sistemas neumáticos para conducir el hormigón a través de un tubo flexible y vencer la fuerza de la gravedad. Es el más económico y eficiente, pero también el que más peligros de desagregación ofrece, y además, a estos problemas se añaden los de obstrucción de la tubería.

Para evitarlo, se utilizan únicamente hormigones de consistencia plástica o blanda y el diámetro de la tubería es siempre superior a tres veces el del árido más grueso.

La solución más segura es la de las cintas transportadoras, pero es también la más cara.

Vertido

Durante el vertido del hormigón en su molde, todos los cuidados giran alrededor de esa misma condición de homogeneidad de la composición (II).

Esta exigencia supone que se vertirá el hormigón desde alturas inferiores a 2 m y que, si la obra exige alturas mayores, se tomarán todas las precauciones posibles, tales como verterlo en pequeñas cantidades o utilizar mangueras o tolvas en trompa de elefante. Además, las capas horizontales o tongadas tendrán una altura inferior a la profundidad efectiva del método de compactación empleado y se ayudará a que la masa de hormigón penetre por todos los rincones.

Por otra parte, debe tenerse en cuenta que el fraguado del hormigón no será posible si se hiela el agua que forma parte de su composición. La adecuación de la puesta en obra al proceso de fraguado (III) exigirá, pues, que se detenga el vertido siempre que "se prevea que dentro de las cuarenta y ocho horas siguientes puede descender la temperatura ambiente por debajo de los cero grados centígrados" (art. 18 de EH-80).

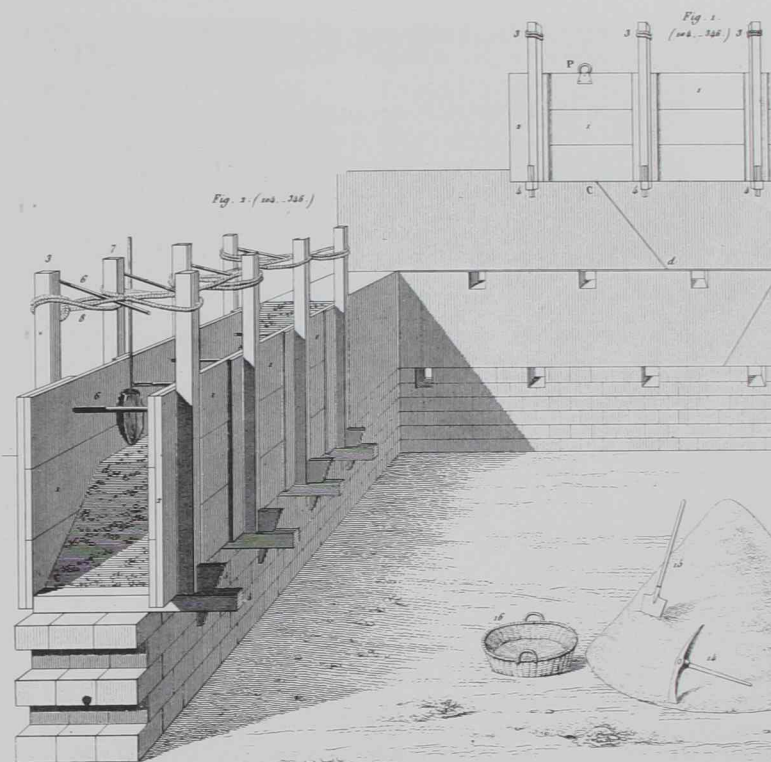
La norma considera las condiciones en qué esta norma general puede ser incumplida, si previamente se han tomado una serie de precauciones. Análogamente, cuando las altas temperaturas, por encima de los 40°C, hagan temer la excesiva evaporación del agua del amasado, debe detenerse el vertido del hormigón, salvo que también en este caso se tomen las medidas oportunas (art. 19 de EH-80).

Compactación

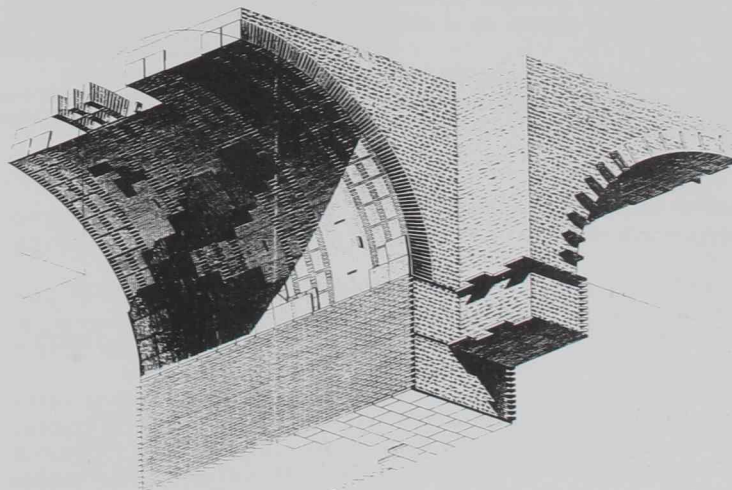
Este tratamiento tiene por objeto dar o devolver al hormigón una característica esencial para su perfecto comportamiento mecánico: la compacidad (II).

Tanto los cálculos de la resistencia como el ensayo de las probetas se hacen sobre hormigones supuesta o realmente compactos. El compactado, pues, consigue una de las características esenciales del hormigón (II) y debe prolongarse hasta que se eliminen todos los huecos y "refluya la pasta a la superficie" (art. 16.2 de EH-80). Los procedimientos "adecuados a la consistencia de las mezclas" de que habla la norma son el hurgado, el apisonado y el vibrado. El primero se utiliza para hormigones plásticos o blandos y se ejecuta con barras de hierro o barros de madera.

El apisonado se hace a golpes de pisón, muchos y suaves, y exige que las tongadas sean de menos de 15 cm. El vibrado, más habitual, es también el procedimiento más eficaz. Puede hacerse con hormigones de consistencias plásticas e incluso secas. Para su perfecta eficacia, las tongadas no deben ser superiores a 60 cm y el vibrador debe coser las capas subyacentes. La duración del vibrado está en función de la consistencia, la forma de la pieza, el tipo de vibrador, etc. Los comentarios a la norma sugieren que la distancia entre los puntos de inmersión debe ser la adecuada para producir en toda la superficie de la pieza una humectación brillante, siendo preferible vibrar en muchos puntos por poco tiempo que vibrar en pocos puntos más prolongadamente.



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.



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 hormigones.



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



7. El total macizado del volumen a moldear se asegura con tratamientos de compactación. El más habitual es el vibrado.



8. 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.

Algunas veces se utilizan en la obra vibradores acoplados a la estructura del encofrado en lugar de los habituales de inmersión, llamados de aguja. En este caso, la firmeza de la fijación y la distribución adecuada serán los cuidados fundamentales.

Curado

Dentro del concepto genérico de curado, deben distinguirse dos niveles substancialmente diferentes: el primero, siempre necesario, garantizará que al hormigón no le falte el agua necesaria para su perfecta hidratación durante el fraguado, y se sitúa plenamente dentro de la exigencia I.

El segundo nivel, más ambicioso, intenta acelerar el proceso de fraguado elevando las temperaturas y garantizando, además, una atmósfera saturada para que la humedad relativa sea siempre suficiente.

El primer nivel, el que siempre es necesario aplicar, puede conseguir esa humedad necesaria por dos caminos compatibles:

- Evitando que el hormigón pierda el agua de amasado, para lo cual éste debe cubrirse con sacos, plásticos, etc. Es especialmente necesario cuando el fuerte viento o el asoleo directo podrían producir importantes fisuras de afogado.

- Regando frecuentemente el hormigón en cuanto el fraguado garantice que no se producirá el deslavado. Siempre será más conveniente regar los encofrados o los sacos que protegen el hormigón.

El segundo nivel se basa en la aceleración del proceso por elevación de la temperatura. El sistema más sencillo será el de aprovechar el calor producido por la reacción agua-cemento e impedir su dispersión mediante alguna protección térmica.

Sistemas más sofisticados utilizarán la calefacción eléctrica, el agua caliente, etc., y sobre todo los tratamientos de vapor.

Desmoldeado

El fraguado no podrá completarse en las condiciones adecuadas si el hormigón es sometido a esfuerzos para los que no está preparado (exigencia III). Por ello, y a pesar de las presiones que puedan existir por parte del constructor que desea rentabilizar la inversión en encofrados más allá de la seguridad, no se deben retirar los moldes "hasta que el hormigón no haya alcanzado la necesaria resistencia para soportar, con suficiente seguridad y sin deformaciones excesivas, los esfuerzos a que va a estar sometido durante y después del desencofrado" (EH-82, art. 21).

Los comentarios a la norma dan, a título de orientación, la fórmula siguiente:

$$J = \frac{400}{(Q/G + 0,5) (T + 10)}$$

Siendo

J - el número de días

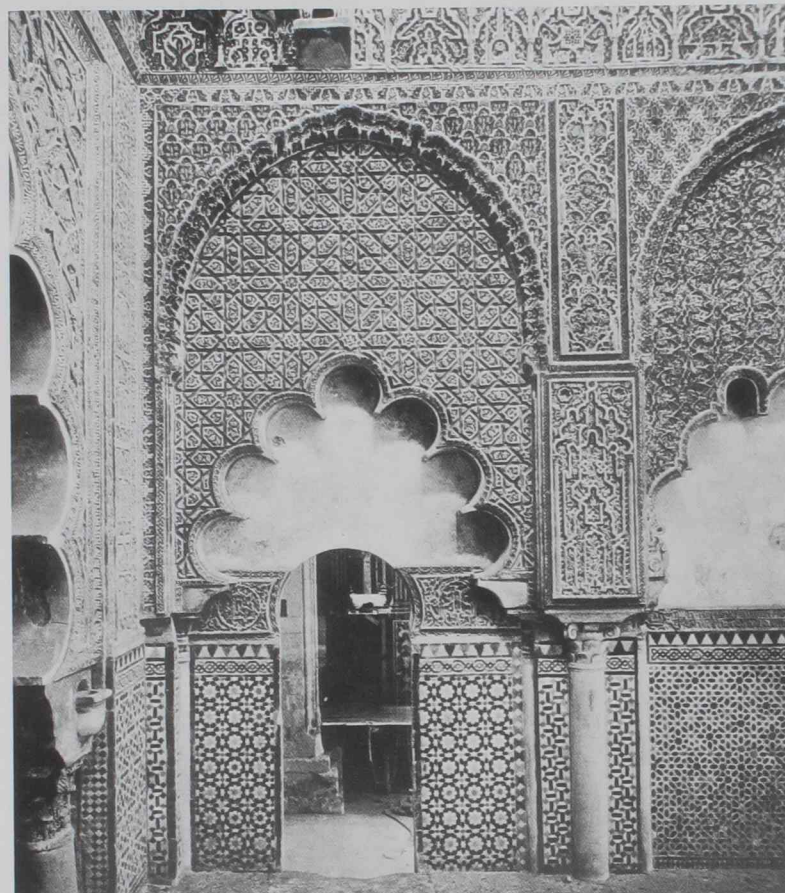
T - la temperatura media

G - la carga al descimbrar

Q - la carga posterior

En cualquier caso, es necesario recordar que, contra lo que hoy se está convirtiendo en habitual, los moldeados y los apeos deben retirarse "sin producir sacudidas ni choques en la estructura".

Esta fórmula, e incluso las costumbres de los constructores, deberán ser revisadas a partir del uso de cenizas en los hormigones actuales.



1. En el tendido encuentra la habilidad artesana su más elaborada expresión. La yesería árabe alcanzó la más absoluta maestría en abigarradas decoraciones como la de la Capilla Real de la Mezquita de Córdoba.

Se incluyen bajo este epígrafe las técnicas que ponen en obra diversos tipos de materiales amorfos, extendiendo sobre un soporte sucesivas y delgadas capas de material.

Se "tendían", fundamentalmente, morteros de cal y de yeso. Hoy, los primeros se han visto sustituidos por los morteros de cemento y han aparecido otros tipos de morteros, como los de resinas vinílicas, e incluso otros materiales susceptibles de ser tendidos, como algunos plásticos expandidos.

La técnica de tender o extender el material se ha basado tradicionalmente en la presión ejercida con diversos tipos de herramientas que prácticamente laminaban el material contra el soporte (fig. 2), pero en algunos casos la consistencia de la pasta permitía lanzar el material contra el mismo. Este lanzado, que primero se hizo a mano con la paleta y luego sacudiendo una escobilla atada a un largo palo, se mecanizó

progresivamente con la tirolesa y con los modernos procedimientos de proyección.

Esta técnica, que ya no utiliza la fuerza humana para el lanzamiento, está desarrollándose velozmente e introduciendo nuevos materiales que pueden ser proyectados.

Este capítulo se dedicará exclusivamente a las técnicas de tendido por ser todavía las más comúnmente utilizadas, aunque la mayor parte de las exigencias que se establezcan son válidas para el proyectado.

La estructura del tendido

La lectura de la definición que introduce este capítulo ya sugiere que la mayor dificultad que introduce esta técnica estriba en que el proceso de conformación del material amorfo



2. En el tendido, los materiales amorfos se conforman mediante un proceso de auténtica laminación entre el soporte y los diversos tipos de herramientas habitualmente manejadas.



3. El material endurece durante el proceso del tendido. La plasticidad cambiante del material debe adecuarse al proceso de colocación para hacer posible la conformación y la adherencia en situaciones tan difíciles como ésta.



4. La fluidez de la pasta de yeso agiliza el proceso de fraguado y, por tanto, exige una gran habilidad al artesano para consumir, en este tiempo, el proceso de tendido.

se hace sin molde. Éste se sustituye por una superficie de soporte sobre la que se colocan las sucesivas capas de pasta. En lugares como los techos, el proceso atenta gravemente contra las leyes de la gravedad (fig. 3). Por ello, las capas que se tiendan sucesivamente tendrán que ser lo suficientemente delgadas como para que el material no se venga abajo o para que no fluya, perdiendo su forma.

La aplicación por capas sucesivas se convierte, pues, en una característica básica del tendido, que puede llegar, así, a conformar elementos del espesor que sea necesario. Es lógico que algunas de las capas se especialicen y la más interior busque fundamentalmente la adherencia al soporte, mientras que las exteriores cumplen la función de embellecimiento del edificio. Esta es la estructura clásica de los revestimientos romanos, constituidos, en general, por tendidos de mortero de cal.

Vitrubio expone cuidadosamente la estructura del tendido: la primera capa, la más interior es la "trullisatio", la "trullisación" según la versión castellana de Josep Ortiz, quien explica el término y justifica su etimología en una nota a pie de página: "La trullisación era la primera mano de revoco que se daba a las paredes para sacar su rectitud, llenar los huecos y

desigualdades que tuvieran y preparar la superficie para el ornato, estuco o greda. Llamábase "trullisatio" por ejecutarse con la llana, a la que los latinos llamaban "trulla", como los españoles". Esta primera capa de regularización de las mamposterías debe dejar "las superficies ásperas y escabrosas" (1). Sobre ella se añade una segunda capa: "Al secarse la "trullisatio" se extenderá sobre ella el "arenatum" (mortero ordinario de cal y arena según la nota 12 de Ortiz), sacando la rectitud horizontal de las paredes a regla y tendel, la vertical con la plomada y la de los esconces con la escuadra...". Para conseguir el espesor necesario, según los objetivos de Vitrubio, esta capa debía triplicarse: "Al secarse se repetirá una segunda y tercera capa, pues cuanto mayor cuerpo tuviera este jaharrado, tanto más sólido y permanente será el enlucido". Completado este segundo estrato funcional, el que da cuerpo y planeidad al revestimiento, es necesario todavía un acabado: "Después de las tres capas de arenado encima de la trullisación, se extenderá una mano de mortero de cal y grano de mármol (estuco)...Al secarse esta mano se dará otra de estuco compuesto de grano más fino y, después de bien manejada y pulida, se extenderá la tercera de estuco todavía más fino. De esta manera, constanding el enlucido de tres capas de arenado y otras tres de estuco, quedará libre de quebras y cualquier otro defecto."

La cohesión

¿Por qué exige Vitrubio tres capas sucesivas de revoco en lugar de una más gruesa? Evidentemente para asegurarse de que el peso excesivo de la pasta no producirá su desprendimiento o simplemente su deformación. Villanueva, en "El arte de la albañilería", nos lo explica con precisión: "No debe ponerse todo de una vez, sino a tongadas o cortezas no tan gruesas y cargadas de material que por su peso se desprendan y caigan, debiendo tenderse unas sobre otras, dando lugar a que se fijen y tomen cuerpo contra la pared, pues si de una vez se quiere dar todo el grueso de la guarnición, siendo ésta demasiado gruesa, todo el trabajo se perderá desprendiéndose y cayéndose a pedazos al poco tiempo" (2). La no existencia de molde fía la cohesión final del revestimiento a esa adherencia entre las capas y al débil espesor de las mismas.

Para conseguir esa adherencia entre capas y la cohesión entre las partículas, así como en el moldeado se recurría a la compactación o vibrado, aquí sólo cabe recurrir a la presión que manualmente pueda ejercerse sobre la capa recién colocada. Todas las recomendaciones técnicas tradicionales insisten sobre la importancia de esta presión, que en la primera capa, sobre un soporte consolidado, se hace "lanzando" la pasta, y que en las últimas se traduce en largas friegas. Vitrubio pide que se golpee "la trullisación con mazuelas hasta su perfecta consolidación". Villanueva habla de "tirar el jaharrado" (3) y de "darle repetidas friegas que unen y aprietan sus partes, y dan dureza, pulimento y hermosura" (4). Serrallach utiliza repetidamente la palabra "violencia" para insistir en la fuerza que debe darse a esta operación: al proyectar la primera capa (5), al extenderla con la llana (6) en los guarnecidos de yeso (7), etc. Entre las precauciones a tomar, cita específicamente el "apretar" bien el enlucido a fin

de que se adhiere bien y no se agriete". En lo que respecta a la puesta en obra, podríamos resumir estas exigencias que derivan del hecho que el material sea amorfo diciendo que la cohesión de un tendido depende de la delgadez de sus capas y de la presión que se ha ejercido en su colocación (Exigencia I).

También, por el hecho de tratarse de un material compuesto, se imponen algunas exigencias, aunque no tan cruciales como las del hormigón. Pueden resumirse diciendo que las capas serán progresivamente, de dentro hacia fuera, menos ricas en aglomerante para evitar que su mayor retracción produzca su desprendimiento.

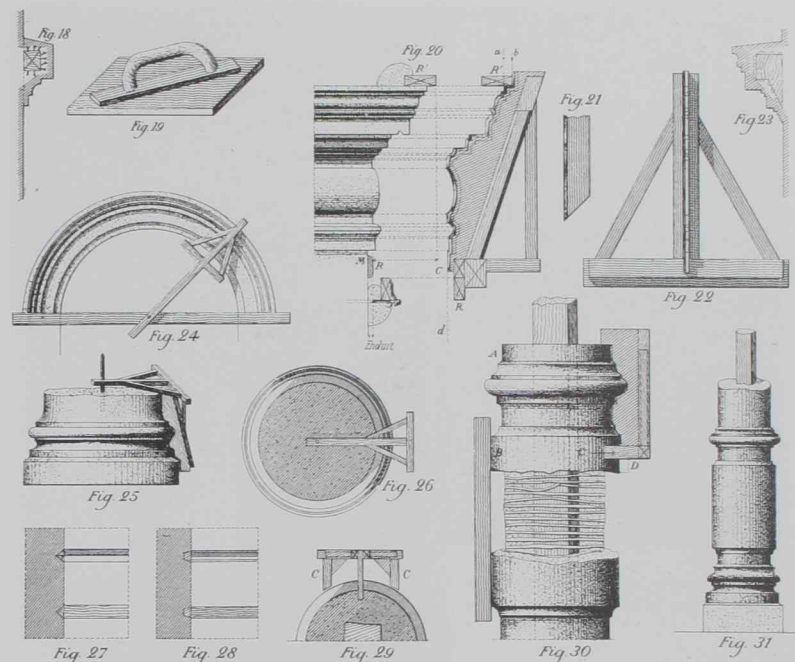
La plasticidad

El mismo objetivo de la cohesión entre capas, el talón de Aquiles del tendido como hemos visto, guía las exigencias sobre la plasticidad. Las diversas velocidades de fraguado de cada material establecen las diferencias tecnológicas fundamentales en la puesta en obra de cada uno de ellos. El rapidísimo fraguado del yeso, y aún más de la escayola, exigen de su colocador un grado de habilidad artesana superior, por ejemplo, al del albañil que revoca con morteros de cal. Esa velocidad de fraguado, ese cambio de plasticidad, no sólo fija el espesor de la capa de mezcla que puede ser colocada de una sola tongada, sino también el volumen de mezcla que se puede preparar cada vez y el tipo de herramientas que pueden utilizarse (fig. 4).

Por tanto, este es un campo en que es difícil establecer recomendaciones genéricas respecto al tendido de cualquier tipo de material, aunque es uno de los más ricos en exigencias concretas para cada uno de ellos, como veremos al analizar específicamente los tendidos de mortero de cemento. Sólo se puede señalar aquí, una vez más, la necesidad de adecuar mutuamente el proceso de puesta en obra y la velocidad de cambio de plasticidad (Exigencia II).

El acabado

Entre las misiones fundamentales de los revestimientos tendidos está la de "acabado", que embellece la construcción. La calidad de las técnicas clásicas en esta materia es sorprendente. Vitrubio nos recuerda que los estucos clásicos llegaban a la perfección de espejos: "Los enlucidos sutiles y de poco cuerpo no sólo se resquebrajan, sino que también en breve se desvanecen. Pero los que reforzamos de cuerpo con las repetidas capas de arenado y estuco, como van aumentando en solidez y recibiendo todo el pulimento con la mano, no solamente salen lustrosos, sino que aún representan los objetos que tienen delante" (9). La calidad del trabajo artesano y la enorme variedad de recursos técnicos para tratar las últimas capas de acabado fueron durante siglos el fundamento de la riqueza decorativa (fig. 5). Villanueva nos habla de esta riqueza y de la degeneración que ya se hacía sentir en el siglo XVIII: "Tendida la mezcla de estuco (mortero de cal con arena de mármol) y bien igualado con la llana, se deja incorporar un poco y se vuelve sobre ello, ya sea para bruñirla con la misma paleta, ya sea para fratasarlo con el



5. El grado de artesanía alcanzado en el tendido ha permitido la ejecución de las formas más complejas ayudándose con herramientas diferentes. La lámina del Tratado Teórico Práctico de Albañilería de Domènech i Mansana muestra diversas molduras ejecutadas con mortero de cemento con ayuda de varios tipos de terrajas.

fratás o talocha, o lavarlo con brocha y agua hasta tanto que queda toda su superficie tersa y unida: todas estas operaciones requieren suma paciencia, repitiéndolas una, dos o más veces, pero siempre con el material fresco, que no haya perdido toda su humedad; y a fuerza de rociarlo a menudo con las repetidas friegas que se le da, se unen y aprietan sus partes, y dan dureza, pulimento y hermosura. Veo con dolor el poco cuidado que se tiene en estas maniobras y cuán toscamente se hacen, y sin duda de esta omisión nace la diferencia que se halla tan notable de las obras antiguas de los griegos y romanos, pues aunque en esto contribuían infinito la buena calidad de los materiales, la manipulación daba toda la consistencia y hermosura" (10).

Hoy, mucho más aún que en siglo de Villanueva, la variedad de texturas se ha reducido drásticamente y la calidad del trabajo artesano apenas existe. Desde el punto de vista del aspecto, la única exigencia que todavía se mantiene hasta cierto punto es la planeidad. La planeidad de la superficie tendida se consigue tradicionalmente por la operación de maestreado, que describiremos más tarde a propósito de los morteros de cemento. La ejecución o no de esta operación distingue los tendidos más correctos o maestreados de los que no lo son y que, en el caso del yeso, se llaman "a buena vista" y, en el del cemento o la cal, "a más ganar". Los defectos de planeidad, que deben ser medidos en pocos milímetros, con una regla de 1 m llegan a medir algún centímetro, embolsan pasta en las áreas próximas al suelo y a las aristas, y dificultan las posteriores labores de carpintería o amueblamiento. Por



9. El enfoscado previo regulariza la obra de mampostería cubriéndola hasta los puntos más salientes de las piedras.



6. Hoy se exige al tendido una planeidad exquisita absolutamente opuesta a la rugosa naturalidad de los tendidos de la construcción popular.



7. La adherencia a la base ha sido siempre una de las dificultades fundamentales del tendido. En la figura se ve el primer tendido sobre un tabique de medianería barcelonés que ha sido cuidadosamente repicado para asegurar la adherencia de un nuevo y más rico revoco pétreo.

todo ello, la calidad exacta del acabado elegido y, en particular, su planeidad forman lo que llamamos Exigencia III (fig. 6).

La adherencia

La adherencia a la base, sea pared o techo, forma, con el acabado que hemos comentado, el grupo de exigencias que tiene su origen en el tipo de elemento constructivo en elaboración. Si planteaba dificultades la adherencia entre capas de un tendido, con mucha más razón debe preocupar la adherencia a la base, a veces excesivamente irregular, como en las viejas mamposterías, a veces demasiado tersas, como en el hormigón moldeado con chapa, sobre un soporte mal preparado, casi siempre sucio, seco o demasiado húmedo, etc. La preparación de la base para conseguir la deseada adherencia se convierte en una de las tareas más importantes de este tipo de técnica (fig. 7). Fray Lorenzo describe la preparación de tapias de barro o tabiques de madera y en estos últimos, por ejemplo, aconseja: "a la madera picarás muy bien, y clavando clavos a trechos, la enredarás con tomiza; y porque los clavos no muestren el orín sobre el yeso, untarás lo que de ellos se viere con ajos; y así lo darás de mano con yeso puro, y quedará unido lo más que ser puede" (1). Fray Lorenzo sigue este texto con una serie de curiosas recetas como el almagre y vinagre fuerte para evitar que las manchas de humo salgan a través de los enlucidos, o los ajos y vinagre si la mancha es de aceite.

Podemos cerrar, pues, esta nuestra enumeración con una última exigencia: La superficie que va a servir de soporte al tendido debe ser preparada cuidadosamente para garantizar la adherencia (Exigencia IV).

Las palabras y las técnicas

Como ya hemos advertido, a partir de la estructura original del tendido de mortero de cal descrito por Vitrubio, se produce una evolución debida, por una parte, a una voluntad de simplificación y abaratamiento del proceso y, por otra, a su adaptación a otros materiales. Las siete capas que se agrupaban en tres paquetes de objetivos diferenciados (trullisación, arenado, estuco) se reducen a lo largo de la historia para quedar convertidas en tres, una por grupo, en el mejor de los casos, y a pesar de la clara advertencia vitrubiana. En este proceso de reducción, los términos que originalmente eran muy ambiguos van tomando un contenido concreto. Voces como jaharrado, guarnecido, revoque, enlucido, enfoscado, se utilizan a veces como sinónimas y siempre confusamente. Esta confusión permite que la evolución reduccionista que hemos comentado atribuya los mismos nombres a técnicas que se van matizando y que definen estructuras del tendido ligeramente diferentes en diversas áreas españolas. El hecho de que la normativa tecnológica del Estado dimane hoy de una sola de estas áreas está llevando a confusiones importantísimas.

En efecto, en Cataluña, se mantiene hasta hoy la estructura de tres capas con objetivos, técnicas y términos específicos para cada una de ellas. La primera, cuyo objetivo era la

regularización de la base, es el "esquerdejat", de "esquerda" o "esquerdill", lasca o astilla de piedra que se embute en la pasta que llena huecos de volumen excesivo en una mampostería muy irregular (fig. 9). Su misión es también la de facilitar el agarre de las capas siguientes, y así como Vitrubio pedía que el acabado de la trullisación fuese áspero y escabroso, en el siglo XIX, Serrallach sigue pidiendo que el acabado de esta primera capa sea irregular (12).

Este "esquerdejat" no será, pues, necesario si la superficie de soporte no es muy irregular y si ofrece adherencia suficiente, ya que, quizás impropriamente, se llama así también a la primera capa de mezcla muy rica que se lanza sobre la superficie muy lisa para, salpicándola, conseguir que ofrezca mejor soporte.

En esta misma línea de tradición catalana, la capa siguiente es la que se maestrea (fig. 10). Para permitir la ejecución de esa operación, su espesor es de un centímetro o algo más, y se llama "arrebossat". El "arrebossat" corresponde al "arenato" vitrubiano, el cual también tenía la misión de conseguir la planeidad "sacando la rectitud horizontal de las paredes con la regla y el cordel, la vertical con el plomo y la de los rincones con la escuadra" (13)

Por fin, sobre esta capa se puede extender una tercera de acabado, que recibe diversos nombres según su técnica y composición, como el "estuc" de cal y polvo de mármol, o el más utilizado hoy, el "lliscat" de lechada de cemento únicamente.

La tradición castellana, por el contrario, evoluciona muy tempranamente hacia la fusión de las dos primeras capas. Villanueva la llama "jarrado" y la distingue de los "blanqueos, revocos y últimos pulimentos de las obras". Esta voz, o la de "jaharrado" e incluso "harrado" utilizada por Fray Lorenzo, tienen su origen en el jaharro o regla que se utiliza para correr sobre las maestras, para conseguir y comprobar la planeidad de la superficie. Es decir, que esa primera capa, o primer grupo de capas, se maestrea. En la primera mitad del siglo XIX se produce una transposición de términos confusa. El término "enfoscado", que para Bails (14), a finales del siglo XIX, significaba "tapar los mechinales y otros agujeros que quedan en una pared después de labrarla", para Matallana (15), en 1848, ya quiere decir "preparar una pared con cal y arena menuda ... dejándola en disposición de recibir el revoco". El éxito del término es cada vez mayor en esta acepción y, a través de los textos del catedrático de construcción de la ETSAM, Martínez Ángel y del Pliego General de Condiciones de Arquitectura, hallamos que el enfoscado se convierte en la capa fundamental del tendido de morteros de cal o cemento, capa que asume las funciones de regularización, resistencia mecánica, adherencia a la base y perfecta planeidad. En la NTE-RPE 74, este criterio deviene norma general. Sobre este enfoscado ya sólo se colocan acabados, en general revocos o estucos, o simplemente tratamientos de la superficie enfoscada.

Martínez Ángel, en 1930, reconoce sólo dos revocos, uno tendido al que llama "pétreo" (fig. 11) y otro proyectado "a la tirolesa" (16).



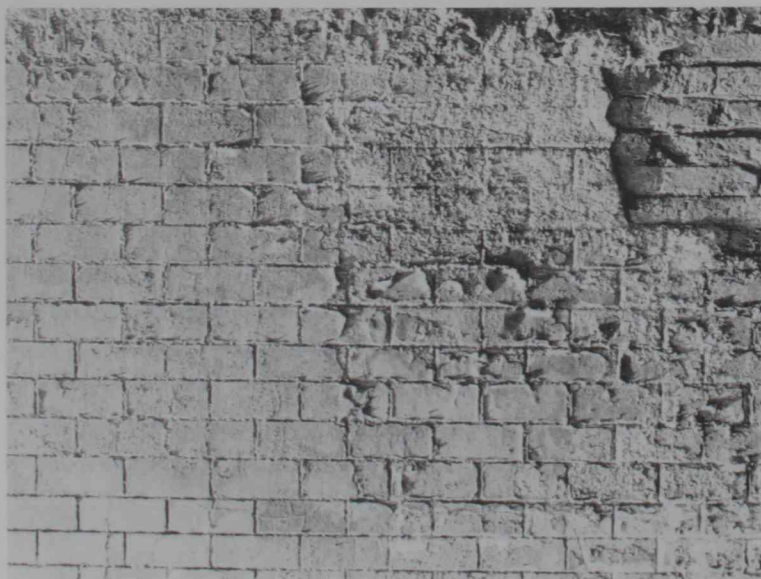
8. En esta cornisa morellana se puede apreciar el proceso de ejecución: Formación del soporte con tablas, repicado de las mismas con azuela para aumentar la adherencia y formación del moldurado por tendido con terraja.



10. La operación que caracteriza la segunda capa del tendido vitrubiano es el maestreado en que la regla o el jaharro corre sobre unas maestras para conseguir la planeidad de la pasta. Esta operación se realiza en el "enfoscado" castellano y en el "arrebossat" catalán.



11. El revoco pétreo conseguía imitar la sillería a la perfección. Gaudí decía que Barcelona parecía al visitante una ciudad rica por la cantidad y calidad de sus imitaciones de la piedra.



12. Con el tendido se ha conseguido cualquier textura. Una muestra de ello son las frecuentes imitaciones de albañilería que mejoran el aspecto de las fábricas descuidadas y les dan mayor impermeabilidad.

Esta simplificación encuentra también aceptación y las NTE-RPR, de 1976, definen, para mayor confusión, un solo revoco de cemento de más de 8 mm de espesor que no se maestra.

Como consecuencia de toda esta confusa evolución aparecen dos tipos de problemas evidentes: en primer lugar, los que derivan de la reducción de capas en la versión castellana y, en segundo lugar, los que derivan de la imposición a todo el Estado de una terminología local.

En el primer grupo, se hace sentir la falta de una reglamentación específica para la primera capa vitrubiana que, aunque ya no es necesaria para regularizar, pues la albañilería suele ser una base suficiente para el maestreado, en cambio es necesaria para garantizar la adherencia a superficies de base cada vez más perfectas, como en el caso del hormigón. Sería necesario, también, regular los acabados reales que tienen espesores de dos o tres milímetros y no limitarse a un solo tipo, el de imitación de la piedra, que tiene objetivos muy particulares.

En el segundo grupo, aparecen graves confusiones de traducción que hacen inútil y peligrosa la normativa del Estado. La versión de enfoscado por "esquerdejat" y de revoco por "arrebossat" que se ha hecho en Cataluña desde Serrallach hasta hoy, pasando por J. Bassegoda y P. Benavent, no tiene ya ningún sentido. Sería necesario, como mínimo, entender "arrebossat" por enfoscado y "acabat" por revoco.

Es evidente, pues, que la única solución coherente pasaría por la edición de una normativa autonómica específica.

Conclusión

Los tendidos se han simplificado radicalmente desde el punto de vista de la técnica de aplicación, pero también han perdido en ese proceso gran parte de su calidad y muchas variedades de textura y acabado (fig. 12).

En particular, el acabado con mortero ha reducido su papel a cierta colaboración en la impermeabilidad y a servir de soporte para las pinturas (fig. 13).

Es cierto que el recurso al esgrafiado y a los estucos planchados no puede hacerse hoy en cualquier tipo de obra, puesto que son más costosos porque exigen tiempo y mano de obra artesana. Pero no es cierto que esa mano de obra no exista o que el coste haga inasequibles estas técnicas para cualquier tipo de obra. Todos estos recursos no necesitan más que el conocimiento y la voluntad de ser exigidos por parte de los técnicos, y los cuidados de una mano de obra que no hay que dejar de utilizar por culpa de nuestra ignorancia.

Técnica del tendido de morteros de cemento

Preparación del soporte y primera capa tendida

Será necesaria una capa de preparación siempre que el soporte sea excesivamente irregular, puesto que el tendido de una capa continua con grandes diferencias de espesor produciría fisuras

por retracción. Esta capa, que sólo cubre las superficies más profundas para igualarlas con los puntos más salientes o "bezotes" (Bassegoda), es la que en catalán se llama "esquerdejat" y no tiene nombre específico en castellano. Hoy, esta capa está totalmente en desuso por el abandono de las fábricas de mampostería y es prácticamente innecesaria en albañilería.

El uso cada vez más frecuente de paramentos moldeados de hormigón u otras técnicas que dan lugar a superficies perfectamente lisas ha provocado, por razones opuestas, la exigencia de una capa especial que garantice la adherencia a la base (Exigencia IV). Esta capa, un débil salpicado de mortero sobre un soporte regado durante 24 horas y secado superficialmente, es la solución propuesta por Prado y Guerra (17), que la llaman "enfoscado previo". Aunque muy lejos de su etimología, podríamos recogerla dentro de una acepción actual del "esquerdejat" catalán.

Salvo en estos dos casos extremos de superficies excesivamente abruptas o excesivamente lisas, parece consumada la desaparición de la "trullisatio" romana y la preparación del soporte se reduce, para satisfacer la citada Exigencia IV, a las siguientes operaciones:

- Limpieza de polvo o suciedad con brocha, escobilla o, si es necesario, con chorro de agua a presión.
- Llagueado de las juntas de mortero, si el soporte es una vieja fábrica y la mezcla no ofrece garantías de cohesión.
- Mojado superficial de las fábricas. Esta operación debe realizarse cuando las fábricas hayan perdido toda su agua de fraguado, para evitar que tomen o aporten agua al mortero (Exigencia de composición).

El tendido maestreado

Sobre la superficie preparada se hace un tendido de mortero al que se encomiendan las funciones básicas de este elemento constructivo: la resistencia y la planeidad. Esta capa se llama "arrebossat", en catalán, y enfoscado, en castellano. Aunque no siempre se considera necesario, lo correcto para garantizar la satisfacción de la exigencia de planeidad (III) es maestrearlo. J. Bassegoda nos explica la técnica tradicional del tendido maestreado (18): "La ejecución, después de preparado el paramento, empieza por las maestras, las cuales son unas cintas estrechas de mortero, perfectamente rectas y verticales (comprobadas con plomada), las cuales sirven de directrices de cada plano de paramento. Obtenidas varias de éstas, incluso las de los rincones o esquinas, se forma el "arrebossat" de cada segmento de una a otra maestra, en dirección de abajo a arriba, echando paletadas de mortero, el cual queda adherido; con el reverso de la paleta se aprieta el mortero (Exigencia I) y se va extendiendo por la superficie del paramento procurando que quede de espesor uniforme. Cubierto todo el paramento entre dos maestras, se apoya una igual (jaharro) sobre éstas y, haciendo de generatriz del plano, se desliza arriba y abajo, haciendo caer el mortero excedente, que se recoge y se utiliza para llenar los rehundidos hasta que el plano está exacto."

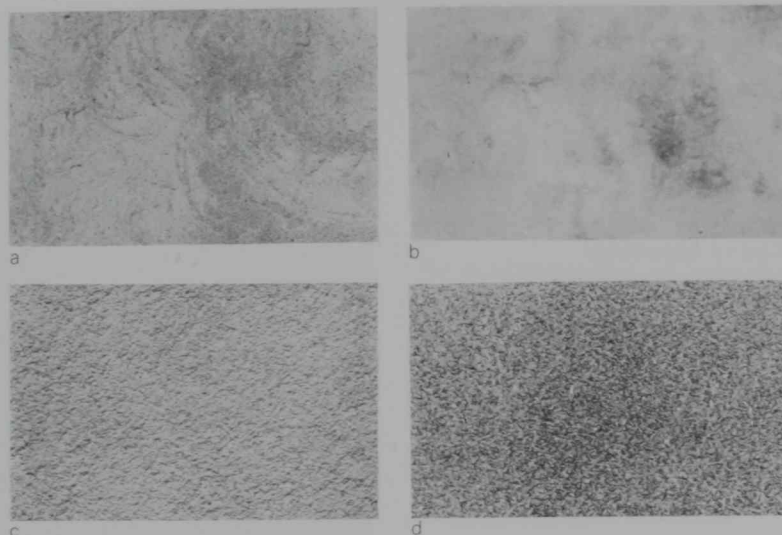


13. El esgrafiado, o dibujo por superposición de tendidos de diferentes tonos, es una de las más espectaculares posibilidades del tendido.

Sobre esta técnica, todos los textos están de acuerdo y las diferencias están sólo en la apreciación del espesor que debe tener esta capa y en la distancia a que deben situarse las maestras. Sobre este último punto, las diferencias son tan grandes como la que existe entre Serrallach, que considera suficiente situarlas cada 12 o 14 palmos, y la NTE-RPE 74, que en su punto 7 las exige cada metro.

En cuanto al espesor, se ha reducido a menos de un centímetro (Bassegoda), un centímetro (Benavent) y uno y medio (Normas Tecnológicas. Exigencia I).

La Norma Tecnológica es muy cuidadosa con la exigencia de adecuación del proceso de puesta en obra a la velocidad de cambio de la plasticidad (II) y exige:



14. Hay muchas maneras de acabar un tendido: a) el fratasado, que se obtiene sencillamente mojando el revoco y frotándolo en círculos con el fratás; b) el enlucido, que se obtiene también a partir del revoco, pero extendiendo una capa muy fina de pasta de cemento; c) el picado, con un cepillo y agua, que hace aparecer el grano y d) el limpiado con un trapo y agua para eliminar la lechada superficial.

- Que se amase exclusivamente la cantidad de mortero necesaria.
- Que no se añada agua al mortero después del amasado.
- Que se suspenda la ejecución en tiempo de heladas, de lluvias, de fuertes calores o de vientos secos.
- Que se mantenga húmeda y protegida la superficie ejecutada durante 24 horas.
- Que no se fijen elementos sobre el enfoscado hasta que éste haya fraguado, y nunca antes de 7 días.

Los controles que la Norma exige hacen referencia a los aspectos de composición de la pasta (I) y limpieza de la base (IV), pero se preocupan sobre todo de la planeidad (III), que debe ser medida con la regla de 1 m. Admite errores de 5 mm para el enfoscado sin maestrear y de 3 mm para el maestreado.

El acabado de los tendidos de mortero de cemento

Sobre esta capa de enfoscado o "arrebossat" puede hacerse directamente un tratamiento de acabado o pueden ejecutarse nuevos tendidos como en la técnica clásica. Es en este punto donde encontraremos más graves carencias en la normativa y en los textos básicos más modernos. La solución elemental y más común es el tratamiento del enfoscado que se llama fratasado: "se rocía (la superficie enfoscada) con un escobillón y luego se pasa el fratás por el mortero en todos sentidos ("arremolinar", en catalán). Así el paramento queda perfectamente regular pero áspero, porque salen a la superficie los granos de arena del mortero" (J.B. Lección 87). "Conviene recordar que, aunque se obtiene una mejor compacidad fratasando el enfoscado, no

siempre es aconsejable hacerlo, puesto que, si bien en el caso de posterior pintura sobre el enfoscado ello resulta conveniente, sin embargo, cuando el enfoscado haya de recibir un acabado de revoco o de estuco, deberá dejarse rugoso para facilitar un mejor agarre sobre él" (19).

Es más correcto acabar el enfoscado con un nuevo tendido para dejarlo completamente liso: es el enlucido (lliscat). Lo expondremos reproduciendo los claros términos en que lo hizo Benavent hace cincuenta años: "El enlucido hay que hacerlo precisamente con cal de leña, mezclando en cada artesa un puñado de arena muy fina para que corra la paleta. El espesor del enlucido conviene que sea muy fino, de manera que casi llegue a transparentar el revoco" (20) (fig. 14).

Bassegoda especifica que el albañil "echa paletadas de mortero contra el "arrebossat", sosteniéndose por la aspereza de la superficie de éste, y luego aprieta la paleta (Exigencia I) por el reverso sobre el mortero, no de plano, sino sobre el canto, y así se extiende en capa solamente de 1 mm o menos de espesor. A veces no conviene que lo sea tanto, para ejecutar ciertas pinturas, entonces se pasa una brocha con agua clara ... y salen los pequeños granos de la arena. En castellano, a esta operación se le llama también "bruñir" el enfoscado".

La confusión grave en esta materia la introducen las Normas Tecnológicas cuando, después de olvidar el enlucido y bruñido del enfoscado, introducen una norma específica de revocos como acabados de gran espesor (más de 8 mm RPR 6). Los dos tipos de revocos de cemento que la Norma reconoce, uno tendido y

otro proyectado, responden en su composición y tecnología a los que describen Prado y Guerra como "revoco pétreo" y "revoco a la tirolesa". El primero, el único tendido, encuentra a su vez origen en el que propone Martínez Ángel en los años treinta. Se trata de una imitación de piedra que se hace con pasta de dosificación 1:1 y que exige cierto espesor. Este revoco pétreo, olvidado su objetivo original y planteado como único acabado reconocido del enfoscado, es absolutamente absurdo. Conserva, sin embargo, su valor para trabajos de reparación o rehabilitación. Su ejecución está cuidadosamente descrita en Prado y Guerra (21).

El estuco

El tendido de más calidad que se puede dar como acabado es el estuco.

Vimos como Vitrubio exigía tres capas de estuco de cal para acabar cualquier tipo de revoco y las distinguía entre ellas por llevar como carga arena de mármol cada vez más fina. En la tradición española, la abundancia y la calidad de yesos y de yeseros explica la difusión de estucos de yeso o "espejuelo". Este estuco de yeso es "el que mejor imita los mármoles y jaspes", y su ejecución la expone con todo detalle Fornes Gurrea, que la llama jaspe artificial (22). Sobre su utilidad, belleza y economía hace toda clase de elogios y, como hacía Vitrubio, nos enseña a hacer incluso tableros de mesa con ellos. Llega incluso a defender su uso en exteriores siempre que "se le den dos o más manos de aceite de oliva, pasándole la mano a fin de que se incorpore en su masa, como igualmente si se le pasa o frota

con mugre de tocino rancio".

Siguiendo la exposición de los tendidos de mortero de cemento, sólo describiremos superficialmente los tipos de estucos de mortero de cal que pueden extrapolarse al cemento o superponerse a tendidos de este material. Casi todos los textos citan los estucos en frío y en caliente. Serrallach califica los primeros de mates y los considera útiles para imitar piedras como las de Montjuïc, si se trabajan luego con la bujarda. Su descripción coincide prácticamente con la de Benavent, muy posterior en el tiempo: "Para estucar en frío hay que extender con el fratás y después con la paleta por lo menos tres capas sucesivas de la mezcla indicada ... apretándolas bien, es decir, describiendo con el remolinado y después con la paleta arcos de círculo en su superficie y en diversas direcciones, comprimiendo fuertemente la última" (23). Prado y Guerra, además del citado acabado a la martellina, citan otros parecidos, como la rasqueta o los lavados para imitar diversos tipos de piedras, con despieces, almohadillados, etc. (fig. 11).

El estuco en caliente se caracteriza por la doble pasada de la plancha de hierro caliente sobre la tercera capa del anterior. Previamente se le da una mano de jabón para aumentar el brillo (24) y, si lo exige la piedra a imitar, previamente se puede pintar con pincel para imitar el veteado.

El esgrafiado, estuco decorativo obtenido por superposición y recortado de tendidos de colores diversos, es una técnica muy específica y no es éste el lugar para exponerla detenidamente (fig. 13).





1. La fábrica de ladrillo se ha entendido generalmente como un aglomerado de piezas pequeñas, como es evidente en este muro de una pequeña iglesia bizantina ateniense. Una auténtica pudinga, como decía Cardellach.

La técnica de la unión de los pequeños conformados es la albañilería. En ella, las pequeñas piezas, sean piedras, ladrillos u otros materiales, se "unen" para dar lugar a un elemento constructivo de cierto tamaño, cuyas características formales y funcionales pueden ser radicalmente diferentes de las piezas elementales. Cardellach califica estos conglomerados de "estructuras cohesivas, conjunciones de material no metálico en gran número de elementos componentes, unidos de tal modo que forman una sola masa, es decir, un monolito de pudinga artificial, alcanzado con la mixtura de mortero y piedra o ladrillo" (1) (fig. 1).

Para que se dé este efecto cohesivo es necesario que la pieza aglomerada sea incomparablemente más pequeña que el elemento constructivo a realizar y es esencial que, en su mayor parte, esas piezas estén totalmente bañadas por el aglomerante. Para ello, los elementos constructivos deberán ser grandes y sobre todo gruesos, y las piezas, mampuestos o

ladrillos, tendrán que ser lo más pequeñas posible. Estas condiciones se daban en la construcción tradicional, pero se han ido reduciendo los espesores e incrementando el tamaño de las unidades (como es el caso del bloque de hormigón o el tabique de escayola) hasta perderse por completo esa equilibrada relación de tamaños, base de la albañilería. Con razón se quejaba Villanueva en 1827: "Los antiguos siempre prefirieron en sus obras la mampostería de piedra menuda y no sé por qué razón se desea ahora la más crecida" (2) (fig. 2).

Exigencias que dependen del tipo de material

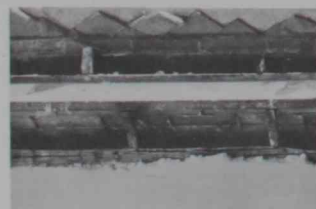
En cualquier caso, la bondad de las características finales del elemento constructivo dependerá, a pesar de las dificultades dimensionales citadas, del grado en que se haya conseguido esa "cohesividad" fundamental que exigía Cardellach. Él mismo señala que la deseada "birresistencia", resistencia a la tracción, además de la compresión de una estructura de este



2. La calidad del aglomerado de la fábrica es mayor si las piezas no son de gran tamaño y la pasta las envuelve convenientemente como en los muros del recinto del Monasterio de Sandoval (León).



3. La fábrica, del tipo que sea, será más firme si la línea más débil, la de unión pieza-pasta, es muy laberíntica. Por ello, la primera ley de la trabazón es romper la junta de la hilada inferior. La perfecta adherencia y trabazón de una buena fábrica se reflejan en la rotura de este macizo.



4. La máxima expresión de recurso a la junta laberíntica es la formación de un tablero de azotea por tabicado de rasillas. Una capa sencilla, una segunda con la misma directriz pero a matajunta y una tercera girada, en espiga o "a la mezcla". Y, sobre todo ello, el pavimento.



6. Las construcciones ciclópeas optimizan el uso de los grandes bloques y aseguran la trabazón gracias a la complejidad geométrica de las juntas.

tipo, "crecerá con la capacidad tensiva de los elementos constituyentes y con la cohesión entre los mismos" (3).

Estas son, pues, las condiciones básicas que el tipo de material, pequeños elementos, exige a este tipo de unión. La técnica de puesta en obra tendrá que conseguir esa "cohesión" entre las piezas, supuesta la "capacidad tensiva de los elementos". Para ello, la albañilería utiliza dos estrategias: 1ª. Ordenar las piezas de tal manera que cualquier plano de rotura por tracción corte el mayor número posible de ellas. 2ª. Incrementar en lo posible la adherencia pieza-aglomerante.

La trabazón

La primera exigencia es, pues, la de conseguir la máxima trabazón física entre piezas, o dicho de otra manera, hacer lo más laberíntica posible la superficie de contacto pieza-pasta para que sea más difícil una posible dislocación por la aparición de componentes de tracción que superen la adherencia entre ambos materiales. Se trata de que cada pieza cubra las juntas que tenga la superficie sobre la que se coloca. En el caso de un muro de mampostería, supone que una pieza debe cubrir siempre la junta de la hilada inferior. Los canteros gallegos dicen: "Una sobre dos, canterín de Dios" (4) (fig. 3).

Casinello expresa así esta exigencia en sus leyes de traba para el caso del ladrillo: "Evitar la continuidad de las llagas de una misma vertical" (5). Esta norma no es específica del muro de ladrillo; si se tratase de una bóveda tabicada, o de una solera, buscaríamos que cada pieza cubriese parte de la sogá y tizón de la de abajo. Y aún si hubiera una tercera, la giraríamos para formar, por ejemplo, una espina de pez (fig. 4). Para que el solape sea eficaz debe ser lo mayor posible, siempre superior al espesor de la pieza. Para los muros, en su cuarta ley de traba, Casinello exige más de 5 cm de solape.

Si el muro es de más de medio pie, es necesario garantizar la trabazón en el espesor del muro y por ello la segunda de las citadas leyes dice que "debe disponerse el número suficiente de ladrillos a tizón". El resto de las leyes de Casinello son normas de sentido común que derivan de éstas: que "deben emplearse el mayor número posible de ladrillos", así será más fácil conseguir mayores solapes; que "los solapes normales son de 1/4, 1/2 y 3/4 de la longitud de la sogá" para disminuir el número de piezas especiales; que deben "guardarse las verticales de las llagas" porque de otro modo se pierden los solapes.

A partir de estas leyes de trabazón, las tradiciones locales y los diversos objetivos constructivos han dado lugar a aparejos muy diferentes. Recordemos aquí sólo los más comunes (fig.5).

Son, en primer lugar, los que surgen de la repetición de una misma situación del ladrillo en el muro, según cada una de las tres caras.

Es decir:

- 1) "A panderete", con todos los ladrillos mostrando su cara. El elemento constructivo medirá 5 cm.
- 2) "A sogá", con todos los ladrillos mostrando su sogá y

apoyados en su cara. Es el que habitualmente utilizamos hoy en los muros de 15 cm.

3) "A tizón", o "a la española", con todos los ladrillos mostrando su tizón y apoyados en la cara. El muro medirá 30 cm.

En todos ellos, el cumplimiento de las leyes de traba se garantiza colocando la junta vertical o llaga sobre el eje del ladrillo inferior.

La construcción con el ladrillo "a sardinel", mostrando el tizón y apoyado sobre la sogá, no constituye un aparejo porque no puede cumplir las leyes de traba.

Para levantar muros de ladrillo de medio pie (15 cm para el formato catalán y 12 para el castellano), la forma más lógica de cumplir las leyes de traba es superponer hiladas de sogas desplazadas.

Pero para muros de un pie de espesor, la posibilidad y exigencia de disponer ladrillos a tizón abre una infinidad de combinaciones posibles. La mayor parte de estos aparejos tienen un nombre que los adscribe a un país con tradición en albañilería, pero las diferencias, más allá de la estética, son muy sutiles. Radicalmente diferente de todos ellos es el aparejo castellano, que dispone todas las piezas a tizón. Sus ventajas son la máxima adecuabilidad a los asientos diferenciales, pero la contrapartida es de mínima barrera impermeable.

Un aparejo con muchos ladrillos a sogá y pocos a tizón, el holandés por ejemplo, puede estar en el límite del comportamiento solidario entre las dos caras o ser más rígido frente a los asientos diferenciales, pero también será más impermeable y cumplirá mejor las leyes de traba.

La exigencia de trabazón en la construcción tradicional

La importancia atribuida a la trabazón se evidencia en la tradición oral, como muestra el refrán cantero citado unas líneas más arriba, y en los restos edificadas de mayor antigüedad, como muestran las trabadísimas fábricas poligonales de las más primitivas culturas (fig. 6 y 7). Pero es en los textos de los tratadistas donde esta exigencia se hace patente.

Vitrubio inicia su admonición recomendando los sistemas de sus siempre admirados griegos que "disponen las piedras colocándolas alternativamente sobre las juntas, y las van trabando y uniendo con el mortero" (6).

Fray Lorenzo, que en la parte constructiva de su texto glosa muy directamente a Vitrubio, dice que "la junta de los sillares ha de procurar que coja el medio de cada uno, de suerte que no sólo dé firmeza con su trabazón, sino que hermosee la fábrica" (7). Gurrea insiste en que deben "cumplirse las reglas de sogá y tizón, encontradas sus juntas horizontales y verticales para mayor trabazón" (8).

Pero el más contundente es Juan de Villanueva: "La trabazón necesita una de las mayores atenciones del albañil. Llámase

trabazón al orden de colocar ladrillos, piedras y demás materiales, de modo que se aten, entrelacen y unan unos con otros; se debe observar por regla constante que toda junta de dos ladrillos quede cubierta con otro ladrillo de la hilada superior, y esto no sólo se deberá procurar por el frente, sino por el interior y grueso de la pared" (9); y más adelante, "nunca se dejará una junta sobre otra, de lo cual debe cuidar el albañil con suma atención, pues en esto consiste la solidez de la obra, y conviene que adquiera costumbre firme de colocarlos siempre así".

Los problemas de trabazón de Brunelleschi

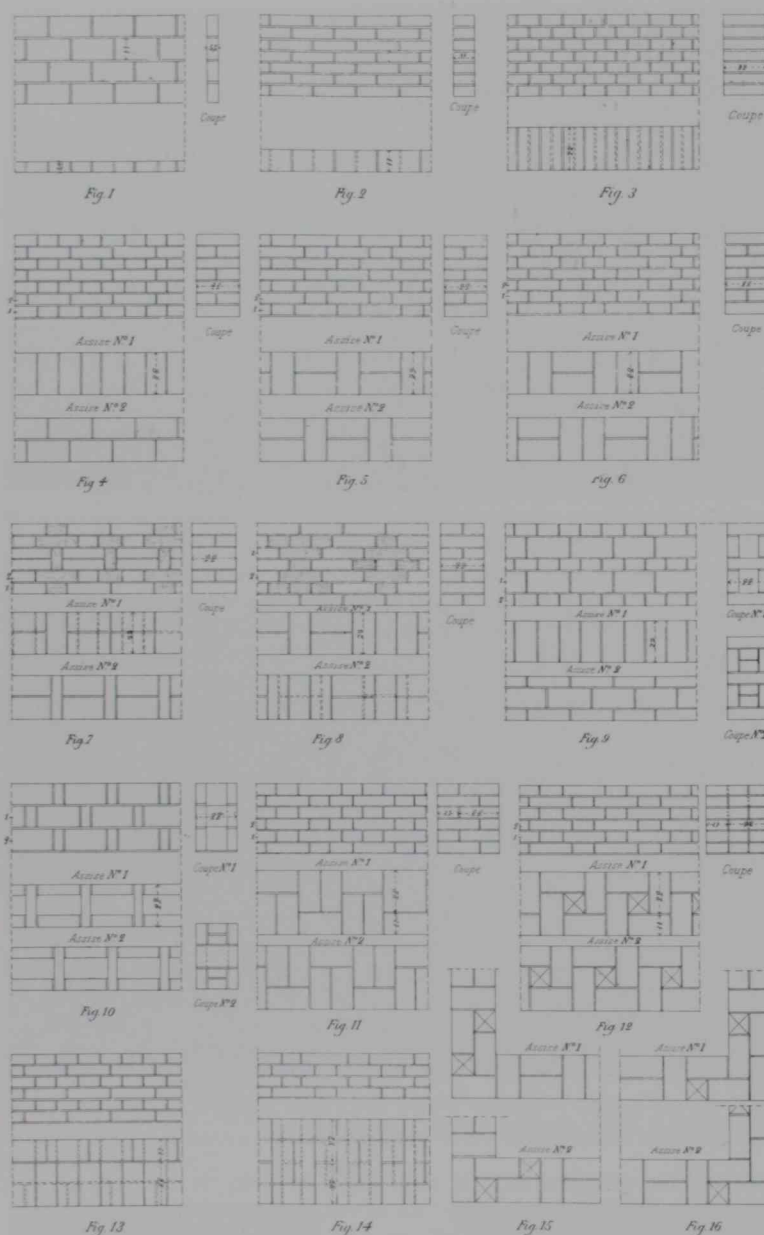
Cuando Brunelleschi se plantea la construcción de la cúpula de Santa Maria dei Fiore, "tan amplia como para cubrir con su sombra todos los pueblos toscanos", acomete una de las obras de albañilería más complejas de la historia. La desaparición de los artesanos carpinteros que eran capaces de construir una cimbra de madera que soportase el gigantesco peso de una cúpula durante su construcción, complicó la culminación de una obra que había iniciado Arnulfo en 1294 y sobre la que Talenti había iniciado el tambor en 1357. La idea de Brunelleschi, que permitía el volteo de la cúpula sin cimbras, fue muy difícil de aceptar por los representantes del gremio de la seda, promotor del edificio, aunque su revolucionaria propuesta no hacía más que recuperar elementos implícitos en la construcción romana y persa, pero olvidados a principios del siglo XV.

Brunelleschi consiguió, efectivamente, levantar su cúpula entre 1420 y 1436, pero su solución para una construcción autoportante estable llevaba implícito el punto más débil de su obra de fábrica.

En efecto, Brunelleschi utilizó su aparejo basado en la colocación de unos ladrillos verticales cada cuatro o cinco ladrillos horizontales; la figura 8 muestra un esquema de adaptación de la idea a una cúpula de medio pie de espesor. La sucesión de ladrillos verticales forma una "espiga" en la que cada ladrillo puede "volar" gracias a la gran superficie de adherencia con el anterior. Entre dos de estas espigas, cuatro ladrillos no pueden resbalar hacia el interior porque forman un arquillo que está estribado por esas espigas.

La preciosa sanguina (fig. 9), atribuida a Antonio de Sangallo el joven, presenta el sistema de "las bóvedas redondas de ladrillos tal como se construyen sin cimbra en Florencia". No podemos entrar aquí en la increíble complejidad que supone la adaptación de esta idea esquemática a una cúpula de planta octogonal, sección realzada, doble cáscara y enormes espesores, pero la figura 10 muestra la dificultad de los aparejos y la increíble calidad de la ejecución. El espesor de la junta no suele exceder los 2 mm, los ladrillos se aplantillan y agramilan para permitir el acuerdo en el diedro y en los cambios de plano que, con la elevación, van inclinando hacia adentro las sucesivas hiladas, etc. La figura 11 muestra una aproximación al proceso de construcción de esta gigantesca obra.

Sin embargo, en esta misma ingeniosa solución, en la famosa



5. Esta lámina del tratado de albañilería, traducido y difundido en España por Domènech i Mansana, muestra diversos tipos de aparejos tradicionales.

"espiga", está el talón de Aquiles de la construcción. La unión entre la espiga y el resto de la obra no cumple, evidentemente, las leyes de traba y supone una línea de mínima resistencia que ya ha provocado la fisuración de la cúpula en algunas juntas en espiga (fig. 2) (10).

La trabazón es la exigencia mínima fundamental de la albañilería y la increíble calidad de diseño y ejecución de esta maravillosa fábrica no puede suplir las deficiencias de esa mínima transgresión de sus leyes.

La cohesión

Citábamos como segunda exigencia, planteada por la forma de la pieza, la de conseguir la máxima adherencia entre piezas y aglomerante. Esta cohesión dependerá, por lo que respecta a la puesta en obra, de la presión que los mantenga unidos mientras fragua este último.

Otros aspectos, como la calidad del aglomerante y la rugosidad de las piezas, dependen ya de los materiales aportados. Hoy, los ladrillos mecánicos presentan superficies menos rugosas que los tradicionales, pero compensan esa desventaja con los agujeros del perforado, que aumentan la superficie de contacto y transforman la tracción, según las caras, en esfuerzo cortante en los puntos de contacto de las perforaciones. A pesar de ello, debemos reconocer una notable reducción de la cohesión en las fábricas modernas respecto a las antiguas, debido sobre todo al abandono de los morteros de cal. Aunque este texto no ha entrado en el tema de los materiales y sólo lo ha hecho en el de las técnicas de puesta en obra, no debe perderse ninguna ocasión para insistir sobre todos los problemas que se derivan del uso de aglomerantes cada vez más resistentes, basados exclusivamente en cementos PA. Los inevitables movimientos mecánicos y térmicos que sufre la obra producen la fisuración de los aglomerantes. El uso de morteros muy resistentes no evita, sino que agrava el problema al introducir importantes retracciones. Estas fisuraciones pueden no ser muy graves en un muro interior, pero atentan gravemente contra la impermeabilidad de las fachadas. Sólo el mortero de cal dispone de un utilísimo mecanismo químico que le permite enfrentarse a este problema. La caliza, fruto de la carbonatación del hidróxido de cal (cal apagada), es ligeramente soluble en agua y forma, en presencia del anhídrido carbónico, un bicarbonato cálcico más fácilmente soluble. Esta reacción es reversible y es similar a la que tiene lugar en la formación de estalactitas y estalagmitas (11).

Todo ello quiere decir que el mortero de cal puede sellar las microfisuras que los movimientos diferenciales produzcan, pues la entrada de agua y aire volverá a abrir el ciclo de bicarbonatación, solución y nueva formación de carbonato más estable. La operatividad de este mecanismo químico de autosellado no sólo se demuestra por el magnífico comportamiento de los muros de cal históricos, sino que se percibe en análisis microscópicos. El uso de aditivos aireantes o plastificantes no ha hecho más que debilitar todavía más esta importantísima unión, puesto que el aire ocluido ciega la cal que llena los canalículos de la cerámica.

Pero nuestro análisis estaba centrado en la puesta en obra y, desde este punto de vista, la presión entre mortero y ladrillo es el factor más importante para conseguir la cohesión; sin embargo, la fuerza que se ejerza no podrá ser muy elevada, porque el mortero fluido sería expulsado totalmente de la junta. La técnica tradicional, "el restregón", consiste en colocar una pella de mortero sobre varios ladrillos de la hilada inferior, y sobre este tendel poner el ladrillo y arrastrarlo hacia su vecino hasta que la llaga tenga el espesor deseado (fig. 13). Posiblemente ese movimiento favorezca más el íntimo contacto entre ladrillo y mezcla que los golpes con el mango de paleta que algunos autores recomiendan, pero que Serrallach proscribió: "El espesor de la junta de mortero será lo menor posible, es decir, de 0,007 a 0,01 m, los ladrillos deben colocarse a baño flotante de mortero, y al colocarlos no se les debe golpear, sino rozarlos bien a fin de que se asienten" (12).

Cuando las piezas se colocan a panderete, la técnica del restregón se sustituye por la colocación y compresión de la pieza sobre su inferior y vecina, habiendo depositado previamente sobre la misma dos pellas de pasta sobre su sogá y tizón.

Cuando se trata de doblar un elemento ya realizado, puede utilizarse la técnica del "bofetón", que permite una compresión más eficaz. La pasta, en este caso, se coloca sobre la cara de la pieza y con ella se golpea la superficie a doblar con lo cual la pieza queda adherida.

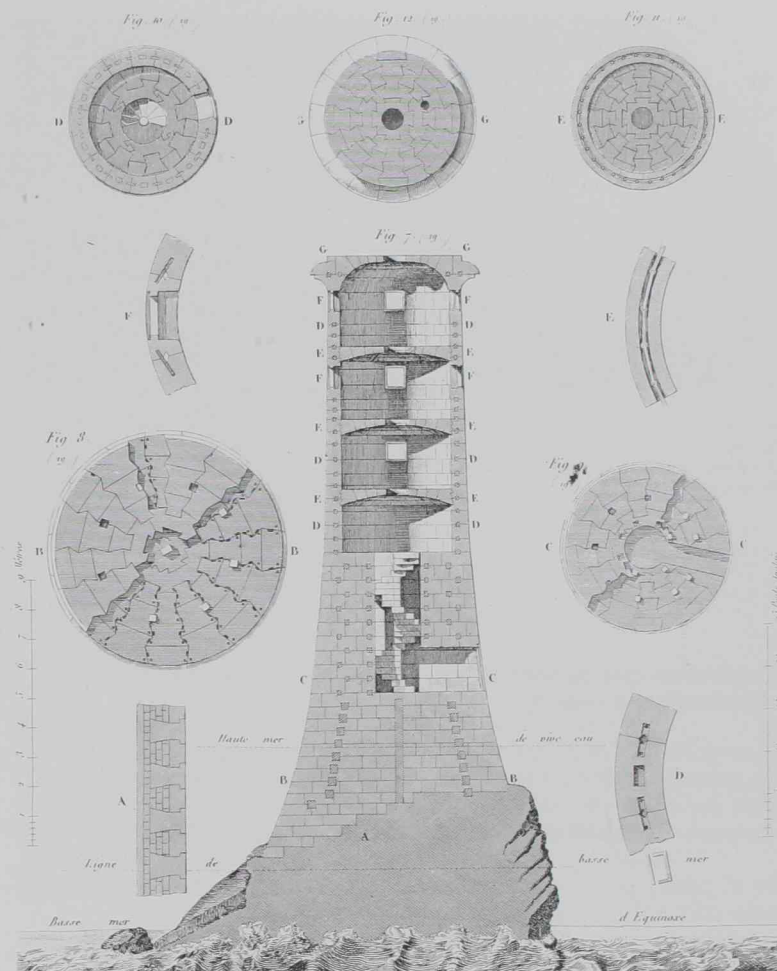
Exigencias que dependen del proceso de puesta en obra

Para que el proceso de puesta en obra se realice correctamente será necesario posibilitar sus dos etapas: la colocación de los materiales y el fraguado de los morteros. La primera parte supone unos andamiajes a veces muy complejos, que no estudiaremos aquí; la segunda exige algunas condiciones que ya se establecieron para los materiales amorfos: temperatura, curado, etc. Específicamente deben cuidarse dos aspectos: que la humedad sea la correcta durante todo el proceso y que el íntimo contacto pieza-mortero no se rompa.

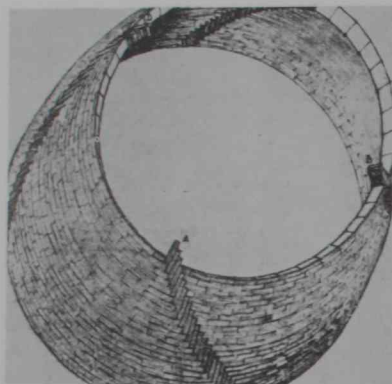
La primera exigencia supone que las piezas, sobre todo si son de cerámica, no van a absorber el agua de fraguado del mortero (fig. 14). Es necesario, pues, "mojar los ladrillos a fin de que no absorban la humedad del mortero" (13).

Fray Lorenzo ya decía que los trabajos de albañilería se tienen que hacer "con abundancia de agua para que con la abundancia de humor se conserve más tiempo, pues consiste la conservación, el todo o la mayor parte, en la abundancia de humor, y en su modo es como el húmedo radical del hombre, pues en acabándose, acaba la vida" (14).

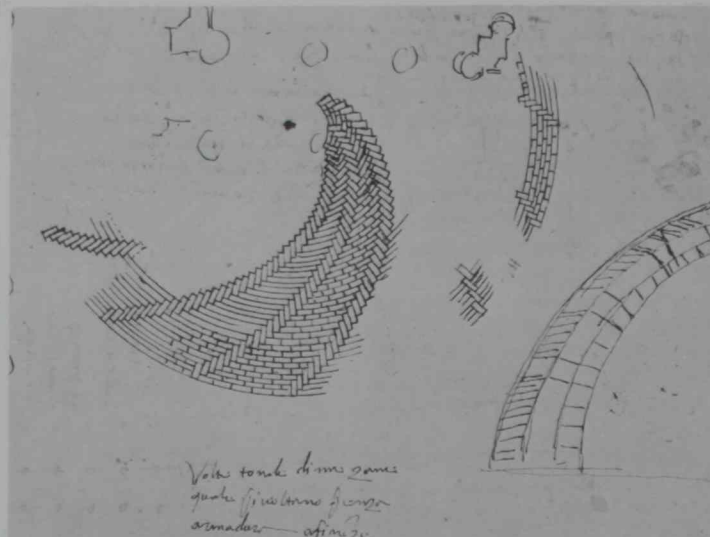
Para que no se rompa el contacto pieza-mortero, será necesario evitar que la obra realizada sufra cualquier tipo de golpes durante el fraguado, por ejemplo, que los albañiles anden sobre la obra, etc., pues una vez roto ese contacto íntimo producido por la presión de la colocación, se pierde toda la adherencia y, por tanto, la solidaridad de la obra.



7. Un ejemplo clásico de recurso sistemático a la trabazón para soportar la más difíciles circunstancias es el famoso faro de Eddystone, levantado por Smeaton en 1759. Obsérvese la talla de los bloques pétreos, diferentes en cada hilada, pero siempre trabados, como un rompecabezas. En la sección, unos sillares a modo de pasadores o trabas, aseguran la unión entre hiladas.



8. Esquema de cómo la rosca de ladrillos verticales y desplazados sostiene una hilada de la bóveda acuciándola y facilitando, por tanto, su ejecución.



9. Sanguina atribuida a Sangallo, donde se explica el proceso de ejecución de una bóveda con traba de ladrillos verticales. Galería Uffizzi, Gabinetto Disegni e Stampe.



10. La magnífica ejecución de la fábrica de Brunelleschi con la rosca de ladrillos desplazados.

Exigencias que dependen de las características del elemento constructivo a realizar

Distinguiremos aquí dos tipos de exigencias: las que dependen de la forma y función de dicho elemento constructivo, sobre todo de la función portante, y las que dependen de su necesaria solidaridad con otros elementos constructivos.

En el primer grupo encontraremos, por una parte, los cuidados para conseguir la deseada planeidad y textura de los paramentos, i por otra, las disposiciones que deben tomarse cuando este elemento está cargado para que esa compresión no produzca las peligrosas componentes de tracción que la baja adherencia entre piezas no podría soportar.

La planeidad de los paramentos supone algún sistema de referencia para la colocación de las hiladas. Al estudiar en concreto el proceso de ejecución de la fábrica de ladrillo, veremos cuáles son los sistemas y controles que deben realizarse a posteriori. Las texturas que la albañilería puede ofrecer son variadísimas: toda clase de mamposterías, más o menos trabajadas, innumerables aparejos de ladrillo y sus variadísimas combinaciones en las fábricas mixtas. Además, cada una de ellas cambiará su expresión según el tratamiento de la junta: enrasada, llagueada, etc. y según su espesor.

Los elementos verticales de albañilería trabajan fundamentalmente a compresión y, como hemos visto, los aparejos se prevén para soportar esas cargas. Será necesario, pues, para evitar que aparezcan tracciones, que esas fuerzas de compresión no se descompongan según el plano formado por una serie de ladrillos, es decir, que los tendeles deben ser absolutamente horizontales. De otro modo la fábrica podría deslizarse sobre el plano inclinado que formaría el mortero que los llena. Esta condición obliga a subir las fábricas portantes

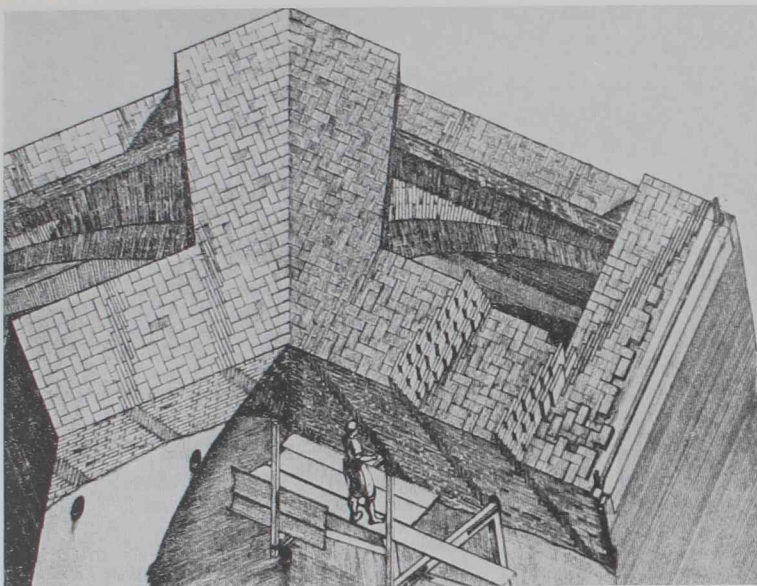
con un cordelillo, también llamado tendel, que asegura la deseada horizontalidad. Por otra parte, la condición de economía de las obras está llevando a fábricas cada vez más esbeltas, en que la construcción catalana moderna ha sido maestra. Una pequeña excentricidad en una fábrica de este tipo puede provocar su rotura por la debilidad de la obra ante los esfuerzos derivados del flexopandeo. Será, pues, necesario exigir la más absoluta verticalidad de las fábricas, lo cual supone el continuo uso de la plomada y de las guías verticales en las fábricas de este tipo.

El comportamiento solidario

Veamos ahora el segundo grupo de estas exigencias: las que buscan el comportamiento solidario con otros elementos constructivos. Un elemento de albañilería puede tener dos tipos de relación con otros elementos: la de absoluta continuidad con otras fábricas y la de soporte de tendidos (fig. 15).

Como soporte de los tendidos las exigencias son muy simples, se trata de dar la máxima aspereza al paramento para la mejor adherencia de las capas tendidas. Normalmente las precauciones se reducen a dejar la junta llagueada para que se introduzca ligeramente en ella la nueva pasta. "Esto se debe hacer con curiosidad, introduciendo la punta de la paleta debajo del ladrillo acabado de sentar y corriéndola formando un planillo inclinado del grueso del tendel hasta la encía del ladrillo de la hilada de más abajo; y en las juntas se hacen las llagas con la punta de la paleta" (15).

Los problemas más difíciles se plantean cuando, por algún motivo, debe unirse una fábrica joven con una vieja, ya que la retracción de las juntas puede provocar fisuras: por ello, "importa mucho que el edificio vaya a un nivel, excusando que en tus obras no haya adarajas, que son las trabazones que



11. Reconstrucción del proceso de construcción de la cúpula de Santa María dei Fiori.



12. Desprendimiento del tendido por las fisuras provocadas en la rosca helicoidal.

quedan para juntar lo hecho con lo que se va haciendo, y por estas juntas de ordinario hacen quiebra los edificios; mas no todos se pueden seguir de una vez, y donde fuerza hay, derecho se pierde. El remedio es en tal caso que en lo que se va haciendo de nuevo, en hechando una altura, cese hasta que esté muy enjuto, porque como lo hecho está ya muy enjuto y lo que se hace está fresco y húmedo, y la humedad, según es notorio de todos, tiene cuerpo, y disminuyéndose el calor, es fuerza que quede abierto el lugar que ocupa, y ésta es la causa que en las juntas de los edificios comunmente hay quiebras, séanse de la materia que fueren: así que procura evitar cuanto te fuere posible las adarajas, mas no dando lugar la necesidad en las obras que arrimes a lo hecho, haz lo dicho de labrarlo poco a poco, y por lo menos cuando yenda no será tanto que afee al edificio" (16). La lentitud en la ejecución puede permitir que las retracciones vayan teniendo lugar con el proceso de la obra y no se acumulen en lo alto de las fábricas. Fray Lorenzo no se fía mucho de sus propios consejos y por ello insiste en que se levante la obra a nivel (fig. 16).

Conclusiones

La albañilería portante se está utilizando cada vez menos. El ladrillo es hoy un material de cerramiento de función poco clara y que se coloca de cualquier manera. Las dificultades de cálculo de la MV-201, las exigencias de la norma al muro resistente, las dificultades para garantizar la calidad homogénea de los ladrillos, la falta de mano de obra artesana, los hábitos de contratar la estructura a empresas independientes y la comodidad del arquitecto, están acabando con uno de los mejores y el más tradicional de nuestros sistemas constructivos.

No debería ser así; la brillante tradición y las magníficas posibilidades expresivas de la albañilería deberían modificar todos esos obstáculos para hacer real la profecía de Cardellach: "De seguir acentuando su perfección serán las estructuras cohesivas, indudablemente, las llamadas a revolucionar el arte de construir y emanciparlo, tal vez, hasta del hierro..." (17).

La ejecución de un muro de albañilería

1º Replanteo

El muro debe replantearse con precisión para garantizar la perfecta transmisión de las cargas sea a los cimientos, sea al muro inferior. En el caso de los cimientos, el proceso aconsejable es el siguiente:

Se trazará sobre el terreno la planta de los muros a realizar y se controlará que los errores de dimensiones estén dentro de las tolerancias expresadas en la Norma MV-201:

*Distancia entre ejes parciales ± 10 mm
Distancia entre ejes extremos ± 20 mm*

Asimismo, se verificará la relación geométrica entre las trazas de los distintos muros. La verificación de las dimensiones y de la geometría se realizará sobre las líneas de los muros, materializadas por medio de cordeles tendidos por el sistema de camillas.

Según este sistema, existen cinco puntos que determinan los planos generadores del proceso de ejecución en el siguiente orden:



13. La buena fábrica consigue la cohesión ladrillo-mortero gracias a la presión y al llenado intersticial que se produce durante el arrastrado de la pieza sobre el tendel de mortero en la colocación "a restregón".



14. Las fábricas insuficientemente húmedas, como la de la figura, absorben el agua del mortero e impiden su correcto fraguado.



15. Los cuidados para que la fábrica ofrezca al tendido una base suficientemente rugosa pueden llevar a soluciones como esta de las murallas de Alcalá de Henares en que, a las llagas naturales, se han añadido otras obtenidas cortando los ladrillos.

1. Eje del muro y de los cimientos para control dimensional.

2. Límite de cimientos (excavación mecánica: línea de cal)
(excavación manual: cordeles)

3. Límite del muro

m. Ancho del muro

c. Ancho de los cimientos

En el caso de la referencia 3, se puede optar por llevar el plano generador del muro hacia una cara (3a) o hacia la otra (3b). Esto tiene importancia cuando se pretenda tener una de las dos caras vistas. No es posible usar las dos referencias al mismo tiempo, dado que los errores de fabricación del ladrillo (± 5 mm) hacen imposible que el espesor real del muro coincida con el nominal dado por m.

2º Nivelación del arranque

Para evitar la aparición de esfuerzos cortantes en la junta (condición 4), debe asegurarse la horizontalidad del arranque. Una vez acabados los cimientos, se comprobará la nivelación de su cara superior. Se admiten desniveles de ± 15 mm. Si éstos resultan mayores, se regularizará la superficie con una capa de mortero de espesor no superior a 2 cm. Si fuera necesario, se pueden colocar piezas cerámicas macizas de reducido espesor.

3º Preparación de la ejecución del muro

Al levantar el muro, será fundamental el control continuo de la colocación de cada pieza para asegurar tanto la verticalidad de los haces como la horizontalidad del tendel; para ello, el procedimiento tradicional prevé el siguiente sistema, según descripción de Martínez Ángel: "Para construir una cítara de asta o de sogá, se colocan primeramente renglones o miras bien aplomadas por sus caras, a distancia uno de otro de unos seis metros, sujetos por su pie con clavos entomizados y yeso, y por el otro extremo con delgados listones clavados a puntos fijos para que no varíen, enfilados dichos reglones en la dirección que debe tener la cítara, pero de modo que su grueso sobresalga del frente de ésta; se toma después con el compás el grueso del ladrillo más el del tendel o capa de mortero, y se va marcando con un lápiz esta dimensión en todo lo largo de la cara aparente de los renglones para tener la altura de las hiladas. Se ata enseguida la cuerda de atirantar en el primer trazo de lápiz, pero

no en las caras de las miras que tocan al paramento, sino en las opuestas visibles, a fin de que quede algo separada y no estorbe".

4º Preparación de los ladrillos

La norma MV-201 describe cuidadosamente los sistemas de humedecimiento de los ladrillos, una de las condiciones fundamentales para garantizar la adherencia entre éstos y el mortero (condición 2).

5º Colocación de los ladrillos

La norma, en el punto 6.3.3, insiste, al describir el proceso de colocación, en que éste será "a restregón".

"Para ello ... se apretará verticalmente el ladrillo y se restregará, acercándolo al ladrillo contiguo ya colocado..." Su objetivo es ejercer toda la presión posible entre pasta y pieza para garantizar la adherencia (condición 2). M. Miguel y otros autores tradicionales citan la conveniencia de golpear el ladrillo con el mango de la paleta para acrecentar esta presión.

La norma insiste en esta condición al exigir que, si hay que mover un ladrillo, debe retirarse su mortero y reiniciar el proceso desde el principio.

Una condición habitual no citada en la norma es la protección del muro de todo tipo de golpes durante el fraguado para evitar la pérdida de la adherencia deseada. El peligro de caída por la acción del viento se considera únicamente en el punto 6.6.

6º Enjarjes

Bajo este epígrafe la norma intenta que la condición de máxima trabazón (condición 1) no se altere por las exigencias de elevación de la obra.

7º Protecciones

Las protecciones habituales contra la lluvia, las heladas y el calor, citadas en el párrafo 6.5 de la norma, intentan garantizar las condiciones higrotérmicas para un perfecto fraguado del mortero a fin de proteger la cohesión del muro (condición 2).



1. El grabado de la Enciclopedia de Diderot y D'Alembert muestra todo el proceso de la cantería. La puesta en obra de ésta es el modelo de cualquier adición de grandes conformados.

La unión de piezas de grandes dimensiones tiende a ser resuelta, cada vez más frecuentemente, mediante sistemas de fijación que concentran en determinados puntos las tensiones mecánicas y absorben con mecanismos específicos las tolerancias, errores o deformaciones diferenciales que plantean esas mismas grandes dimensiones. Sin embargo, hoy todavía se ofrecen como técnicas de adición modernas las que unen, de manera monolítica, piezas de grandes dimensiones. Es el caso de la construcción con grandes paneles de hormigón armado que se adicionan para conseguir una estructura rígida y solidaria con una técnica similar a la de la sillería con juntas de mortero (fig. 1).

Vamos a estudiar, pues, las técnicas de adición de grandes conformados utilizando la referencia de la sillería para entender mejor los problemas de los grandes paneles (fig. 2).

Se tiende a contemplar las técnicas de la cantería como una extrapolación de la albañilería del ladrillo en que se ha incrementado el tamaño de las piezas, pasando gradualmente al mampuesto, al sillar y al componente; pero ello no es cierto en absoluto. Dos factores esenciales diferencian ambas técnicas: uno es su funcionamiento, puesto que la cohesión

entre aglomerante y pieza, esencial en el ladrillo, cumple aquí un papel muy secundario; otro es su ejecución, puesto que el mortero es perfectamente capaz, con su consistencia habitual, de soportar el peso de una o varias hiladas de ladrillo, mientras que un sillar o un gran panel expulsaría todo el mortero de la junta si se le permitiera ejercer su peso sobre ella.

Veamos, pues, con más detalle, cuál es la problemática específica de la adición de grandes conformados.

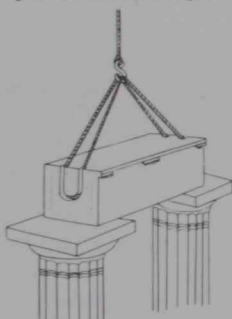
Exigencias que dependen de la forma del material

Sólo recordaremos brevemente la necesidad de controlar la forma y las dimensiones de la pieza que llega a la obra. Un componente de grandes dimensiones forma por sí solo un elemento constructivo y, por tanto, las exigencias que en los capítulos anteriores hemos formulado en función de la forma de la pieza, se trasladarán aquí a las exigencias que dependen del tipo de elemento a realizar. Así pues, además de las citadas operaciones de control de recepción del componente, sólo citaremos las específicas que supone el transporte en obra de una pieza de elevado peso y dimensiones.

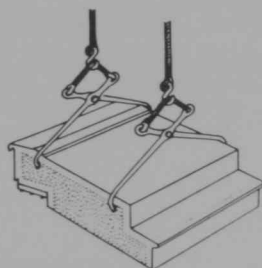


2. El montaje de paneles de hormigón premoldeado en las viviendas edificadas en Stuttgart en 1927 por E. May, inicia los modernos sistemas de adición de componentes producidos en grandes series: los grandes paneles prefabricados.

78



3. Los sistemas de elevación de la construcción clásica recurrían a ranuras acanaladas en los bloques pétreos que permitían liberar fácilmente el cordaje.



4. Uno de los sistemas de elevación que ha pervivido hasta hoy es el de las tijeras que atenazan las piezas. Se usó en Grecia (dibujo de R. Martín) y en la Italia renacentista (fotografía de herramientas del museo de Santa María dei Fiori, en Florencia).

A pesar de ser ésta una de las técnicas punta de la construcción contemporánea, o por lo menos así se decía hasta hace muy pocos años, también en este campo tendremos que reconocer que la mayor parte de los ingenios en que se basa responden a problemas de siempre y apenas han cambiado su forma en dos mil quinientos años de historia. Veámoslo, por ejemplo, en las técnicas e instrumentos utilizados para elevar piezas de gran peso. La solución más antigua para colocar grandes bloques de piedra sobre pilares u otros elementos portantes fue la de construir un plano inclinado por el que deslizar la pieza hacia arriba hasta colocarla en la vertical de su apoyo, para luego, después de extraer la tierra que forma el plano, depositarla en su lugar (1). Los entablados del Partenón constituyen el último caso aislado de uso de esta técnica de elevación. Desde la segunda mitad del siglo VI a.C., los griegos utilizan sistemáticamente los sistemas de elevación por suspensión de la pieza de una jarcia más o menos complicada que, como pueblo de marineros, desarrollaron profusamente. El punto delicado de estas técnicas de elevación, entonces y hoy, es el sistema de suspensión de la pieza. La solución más simple, la ligadura con cabos o cintas, lo que hoy se llaman bragas, es la más utilizada, pero no siempre es posible porque en muchos casos no se pueden retirar las ligaduras cuando la pieza queda asentada. Se recurre, entonces, a entalladuras o tetones previstos en las piezas para facilitar la suspensión y permitir luego la retirada del elemento de sujeción (fig. 3). Las entalladuras se utilizan sobre todo en las piedras más blandas, mientras que los tetones, más fáciles de tallar previamente, suponían luego el trabajo adicional de rebajarlos. Aunque soluciones de este tipo son utilizadas todavía hoy, las coincidencias en técnicas y herramientas son aún mayores cuando se trata de piezas que por cualquier motivo debían quedar desde el primer momento en su posición definitiva. Para ellas se diseñaron dos instrumentos especiales: las tijeras (fig. 4) y las castañuelas. En ambos casos se utiliza el propio peso de la pieza para provocar la acción que lo soporta. En las primeras, el peso se transforma, a través de un mecanismo de hierros cruzados, en una compresión sobre los bordes de la pieza. En las castañuelas (fig. 5), unas pequeñas piezas se introducen en una concavidad especialmente tallada en el cuerpo de la pieza y forman dentro de ella una cuña imposible de extraer por la simple tracción que el peso provoca. Esa cuña provoca unas tracciones en la masa de la pieza que son las que realmente soportan el peso y constituyen el punto más delicado del sistema.

En la técnica contemporánea se siguen utilizando las tijeras sobre todo para la colocación de piezas de forjado. Las castañuelas han sido sustituidas por hembras insertadas, técnica posibilitada por el proceso de moldeado del gran panel, pero que se basa en los mismos principios. La única auténtica innovación que ha aportado la tecnología contemporánea es el uso de almohadillas de vacío que permiten suspender la pieza sin provocar en ella tensiones localizadas y sin perforaciones ni entalladuras (fig. 6).

En cualquier caso, será necesario atender a que durante el proceso de almacenaje y elevación no se produzcan esfuerzos locales insoportables para la pieza (Exigencia I) (2).

Una vez transportada la pieza hasta su posición definitiva, se deberá garantizar su estabilidad para que pueda retirarse el aparato elevador. Si se trata de un sillar, esa estabilidad está garantizada por la propia forma de la pieza, pero, con el uso de elementos de gran esbeltez se ha hecho imprescindible el apuntalamiento con algún tipo de elemento provisional (fig. 7). La laboriosidad de estos trabajos ha llevado a diseñar, en algunos sistemas modernos, piezas formadas por superficies de desarrollo vertical, pero que, por sus formas, son autoestables (fig. 8). Ésta será, desde el punto de vista de la técnica en obra, la exigencia más importante de entre las que dependen de la forma del elemento: garantizar la estabilidad de la pieza durante el proceso de montaje (Exigencia II).

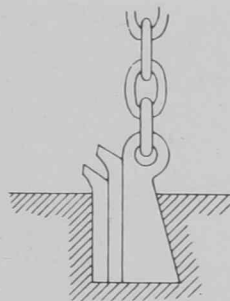
El CEB exige explícitamente, para los componentes de hormigón, que "después del reglaje, los paneles deben sujetarse de tal forma que su posición quede invariable durante la realización de los trabajos" (3).

La introducción del concepto de reglaje nos lleva a la tercera y última de las exigencias que un gran conformado plantea por el hecho de serlo: la perfecta colocación de la pieza en su lugar (Exigencia III). Es lo que suele llamarse el "posicionado". Esta exigencia es especialmente importante cuando se trata de componentes, ya que, al no admitir ningún retoque de su forma en la obra, sólo un montaje cuidadosísimo desde el punto de vista dimensional, puede garantizar la coherencia de todo el "meccano" de piezas. No es posible entrar aquí en todo el complejo mundo de las tolerancias de fabricación y montaje, nociones que corresponden más al moderno diseño del sistema (4). Baste recordar la necesidad de prever el mecanismo que guiará la pieza hasta su posición precisa y la exigencia de sistemas de control que comprueben el éxito de esta operación (fig. 9).

Exigencias que dependen del proceso de puesta en obra

Cuando los grandes conformados se unen mediante técnicas de adición, se suele recurrir a juntas comprimidas en las que es suficiente la interposición de un lecho de mortero, cuya misión es garantizar que esa transmisión de esfuerzos se haga de manera homogénea sin concentraciones puntuales que podrían provocar roturas de la pieza. En efecto, el mortero, material amorfo, se moldea entre los dos componentes e impide el contacto puntual entre dos materiales duros (fig. 10). Como ya hemos enunciado, no se espera del mortero una importante colaboración en la cohesión general de la obra, aunque es posible que en algunas juntas concretas aparezcan ciertos esfuerzos de tracción que pueden ser asumidos por la junta de mortero. En la construcción gótica, por ejemplo, los ensayos realizados han llevado a concluir que la junta puede soportar tracciones de sólo 2Kg/cm^2 (fig. 11).

Se espera, sin embargo, que el mortero cumplirá su función fundamental de almohadilla. Conseguirlo es el problema más grave de este tipo de juntas y a resolverlo se dirigen todos los esfuerzos técnicos. La dificultad consiste exactamente en la excesiva confianza en las cualidades de conformabilidad del material de la junta para que éste distribuya la carga de la pieza superior sobre la inferior, sin que, por esa misma



5. Las castañuelas son otra inteligente herramienta de elevación que ha llegado hasta nuestros días. El dibujo describe una castañuela griega (R. Martín) y el grabado es de Piranesi.



6. La ventosa es uno de los pocos sistemas exclusivamente modernos de elevación de componentes. La figura muestra la construcción de unas viviendas en Bogotá (Town Planning Associates, 1951).



7. La estabilidad de los grandes paneles durante la ejecución de sus juntas exige un sistema de ajeos como el de estas viviendas prefabricadas construidas en Alcalá de Henares en 1975.



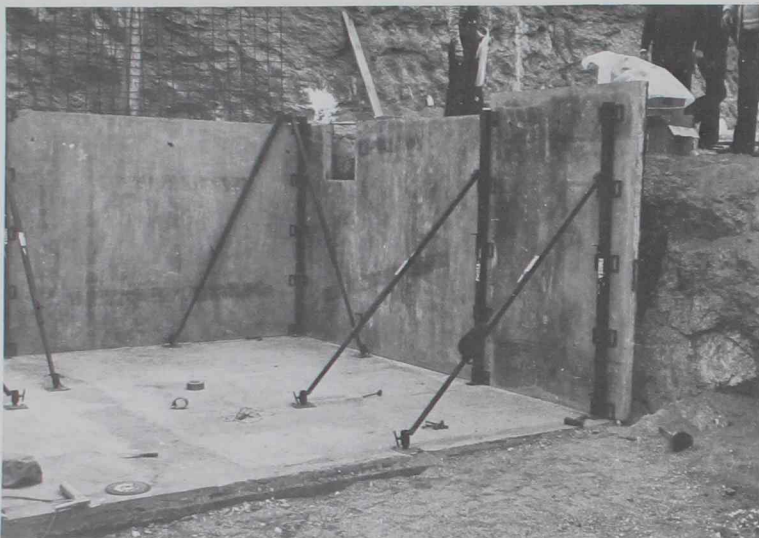
8. Los más modernos sistemas, antes de la crisis de la construcción, utilizaban piezas con geometría autoestable para facilitar el montaje.

cualidad de plasticidad, el material de junta pueda ser expulsado de la misma y la pieza superior pueda descender y apoyarse sobre algunas juntas de la inferior y provocar tensiones concentradas. Al subir el conjunto de la obra, las tensiones se incrementarán brutalmente y producirán desportillamientos y roturas (fig. 12).

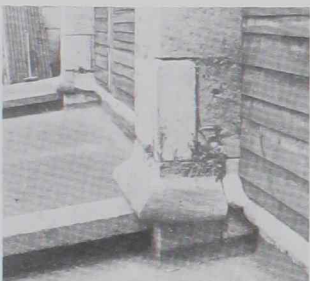
Esa contradicción funcional se agudiza por la retracción del mortero y de los aglomerantes hidráulicos en general, que reducen el volumen de la junta durante el fraguado. Tan grave dificultad ha hecho que la unión de piezas de ciertas dimensiones con aglomerantes hidráulicos para formar elementos portantes presente dificultades que fueron insalvables durante siglos.

Veamos el proceso de colocación de un sillar como, con la mejor técnica conocida, nos lo explica Serrallach (5):

“A baño de mortero. Cuando la piedra que se ha de colocar se tiene a cierta altura encima del punto donde se ha de colocar, se va descendiendo con lentitud y dos oficiales de albañil la van guiando hasta que se pongan los paramentos formando plano común con las piedras que hay debajo, pero sin tocarlas. En esta posición se colocan sobre el lecho superior de la piedra de debajo 4 cuñas de madera bien dura o bien de plomo a unos 0,04 m de los vértices para que éstos no se desportillen, y se deja sentar la piedra, y por medio de la palanqueta, apretando las cuñas, se va moviendo la piedra hasta hacer que todo el paramento forme un solo plano vertical y que la cara de encima esté toda a nivel. Una vez puesta la piedra en la posición en que ha de estar, se vuelve a levantar la piedra, pero sin tocar las cuñas, y después de mojar los lechos y sobrelechos, se pone en el sobrelecho de piedra, que está fijo, una tongada de mortero de un espesor mayor que el



9. La perfecta colocación de los paneles puede garantizarse por varios sistemas. El más seguro es el de posición forzada contra un elemento previamente fijado. En esta pequeña construcción en Cabrera de Mar se utilizaron unas "escuadras" que aseguraban, a la vez, la estabilidad y la posición del panel.



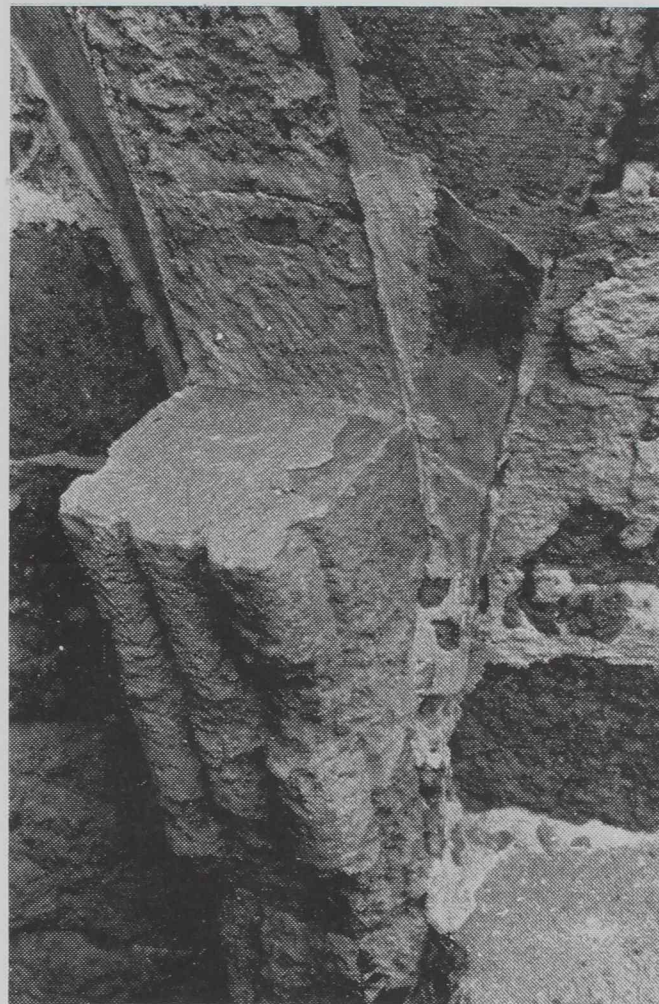
11. La resistencia de la sillería a la tracción es muy limitada. Según Mark no excede los 2 Kg/cm^2 . Como ejemplo, el autor aporta esta imagen de los desórdenes que aparecen en un contrafuerte de la Catedral de St. Owen (Rouen) al ser excedido este esfuerzo, según sus cálculos y según sus experiencias fotoelásticas.



12. El contacto directo entre los sillares de las fábricas produce esfuerzos localizados excesivos y se desprenden lascas o se rompen las aristas, como en este muro pompeyano.

de las cuñas, luego se vuelve a dejar descansar la piedra y ésta, al obrar por presión sobre el mortero, lo comprime y éste chorrea por las juntas, y se golpea la piedra a fin de que el lecho superior adquiriera la horizontalidad conveniente, y después ya se pueden quitar las cuñas para que toda la piedra descansa sobre el mortero".

Rondelet, en una ácida crítica a los constructores de la Iglesia de Santa Genoveva, que le tocó consolidar y completar, analiza los defectos de este tipo de ejecuciones: "La disminución de espesor del mortero por evaporación de la humedad excedente que contiene hace que todo el esfuerzo se transmita a través de los calzos y cuñas, que, no siendo susceptibles de una retracción tan grande como la del mortero, transmiten el esfuerzo a las partes de las piedras entre las que están colocadas y las hacen estallar (saltan pequeños fragmentos).



10. En la cantería, el mortero cumple fundamentalmente un papel de almohadilla para impedir el contacto entre sillares. Este arco gótico derruido muestra la falta de adherencia piedra-mortero y la eficacia en el papel de separación.

Este defecto inevitable se debe a que toda la carga, que debería estar repartida por igual en toda la superficie de los lechos, se sostiene por puntos que no suman ni su sexta parte. Cuando su carga es considerable no sólo las piedras se desportillan superficialmente, sino que se rompen y fragmentan completamente. Las juntas, como en su parte central tienen mayor espesor que en los paramentos, experimentan un mayor asiento. Toda la carga se transmite a los bordes y éstos se rompen, saltan, forman concavidades considerables, desuniones, disgregaciones y grietas profundas que penetran hasta el corazón de la construcción".(6)

La segunda parte de este párrafo se refiere especialmente a los canteros que labraban la piedra sólo por la cara vista, de manera que el resto del volumen quedaba totalmente menguado respecto al paralelepípedo teórico. Por ello Rondelet



13. El plomo es expulsado de la junta bajo los pilares de la catedral de St. Pablo, en Londres.



14. El adelgazamiento de la lámina de plomo ha provocado desportillamientos en este pilarcillo del llamado Mirador de la Reina de la Alhambra de Granada.

acaba acusadoramente: "Este método absurdo, que reúne todos los defectos posibles, no ha podido ser imaginado más que por los malos obreros o los constructores ávidos, que no buscan otra cosa que aumentar sus beneficios a expensas de la solidez de la obra" (7).

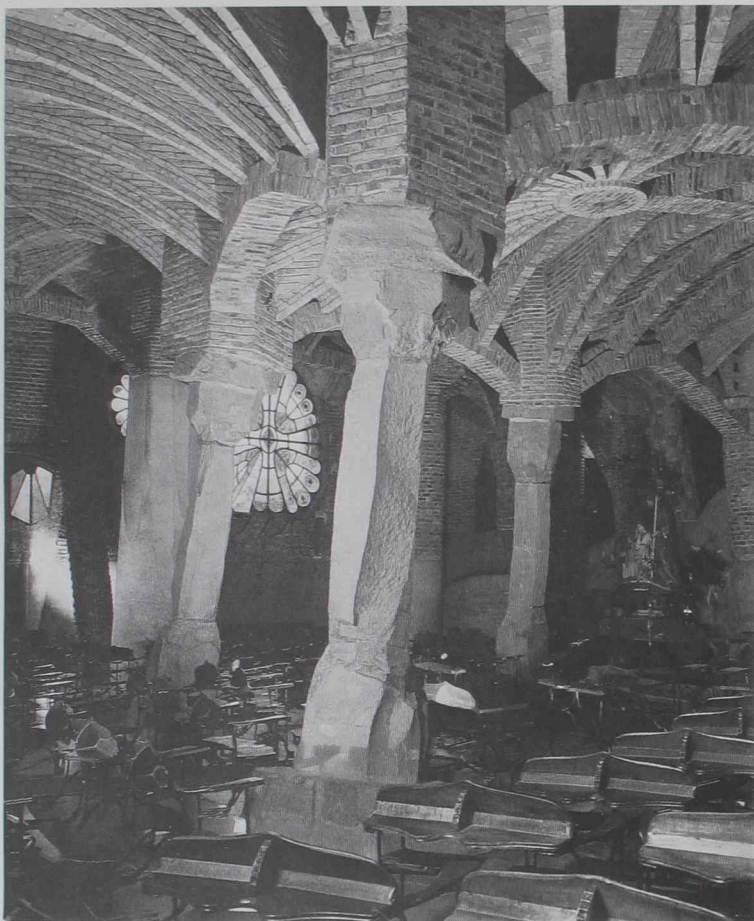
Sin embargo, la primera parte de su crítica es válida para casi todos los sistemas de puesta en obra de grandes piezas, no sólo los de baño de mortero, sino también los que usan procedimientos semejantes.

Efectivamente, el método que Rondelet defiende tampoco soluciona el problema: "Se extenderá una capa de mortero claro hecho con arena muy fina, se colocará la piedra encima en la situación en que ha sido ensayada, se la golpeará con una maza de madera de tamaño mediano, a fin de asentarla sobre el lecho y hacer refluir el mortero excedente". (8)

Es evidente que esta piedra no reposará sobre el baño de mortero, todavía fluido, sino que se apoyará sobre los puntos de contacto, es decir sobre las irregularidades de la talla de ambas piedras (fig. 12). Consciente de ello, Rondelet continúa:

"Para facilitar la colocación de las piedras sobre el mortero, después de haberlo extendido sobre el contralecho, se pueden introducir calzos de madera en los cuatro ángulos y, después colocar la piedra encima. Los calzos se quitarán cuando la piedra esté colocada. Entonces se dejará el sillar sobre el mortero y se golpeará, para que se apoye uniformemente toda su superficie." (9).

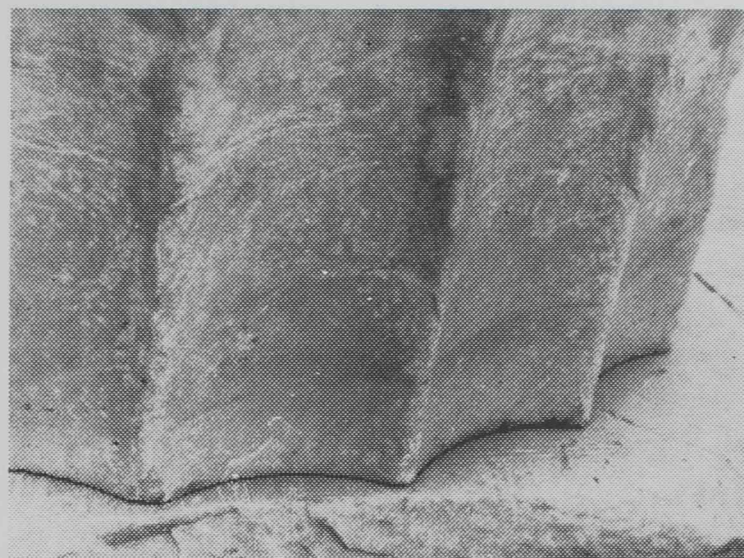
En este sistema el éxito depende de la velocidad de fraguado y del tiempo que transcurra entre el vertido del mortero y la extracción de los calzos. Es evidente que si el mortero todavía está fluido, las piedras volverán a entrar en contacto por expulsión del mortero. Si el mortero llega a endurecer, que es lo más aconsejable, los peligros son los señalados en el primer párrafo de Rondelet: que las cuñas rompan la piedra cuando ésta vaya siendo cargada y, marginalmente, que ésta descienda y se desolidarice de las demás cuando se retiren las cuñas. La salida más aconsejable es quizá la lentitud de la ejecución, para conseguir que sólo se apoye una hilada sobre las cuñas y los sillares puedan seguir la retracción al quitarlas. (fig. 13).



15. También los brutales pilares de la Cripta Güell recibieron y transmitieron sus cargas con almohadilla de plomo, cuyo lagrimeo ha sido repetidas veces recortado.

Rondelet, de todas maneras, no parece muy satisfecho de su sistema cuando, en otra parte de su texto, y después de una crítica al uso tradicional del plomo como almohadilla entre sillares (fig. 14), dice: "que esta práctica es más costosa que útil, en primer lugar por la dificultad de llenar exactamente las juntas en toda su superficie; en segundo lugar porque no todas las piedras pueden soportar sin estallar, la temperatura del plomo, y en tercer lugar, porque mientras quede algo de plomo entre las juntas, éste va comprimiéndose bajo la carga, lo cual prolonga el aplastamiento indefinidamente y forma lagrimeos al exterior que se deben recortar varias veces (fig. 13, 14 y 15). El único uso que podría hacerse del plomo sería el de sustituir con él los calzos de madera en las construcciones de sillería sobre mortero ... porque el plomo se comprime bajo la carga a medida que el mortero adelgaza y toma consistencia, mientras los calzos se resisten y causan desportilladuras" (10) (fig. 15).

Diremos, al hilo de este comentario sobre el plomo, que Rondelet no debía conocer el uso magnífico del plomo



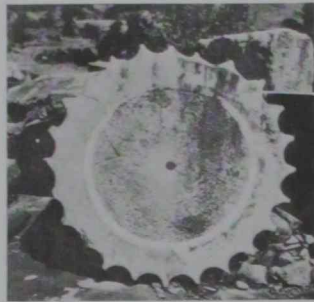
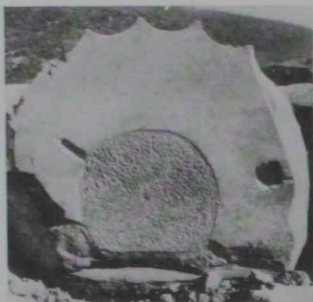
17. Sólo la perfección de la cantería griega hizo posible el apoyo directo de piedra contra piedra, como en este tambor de una columna del Partenón.



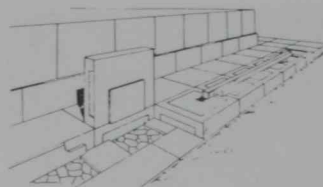
16. La expulsión de un adhesivo de resina bajo piezas de gran peso se evitó en esta obra de Viella colocando la resina dentro de unos marcos de neopreno. La elasticidad de los marcos garantizó la entrada en carga de la resina.

confinado como transmisor de cargas. En efecto: es cierta la expulsión continua de que se queja, pero puede solucionarse brillantemente con un simple anillo o abrazadera como, según Choisy, se hizo ya en San Vitale en Ravenna (11). Este tema tiene hoy amplia trascendencia en muchos campos, como en el caso del pegado con morteros de resina de juntas que recibirán inmediatamente altas compresiones. Ignorantes del precedente de Ravenna, usamos el sistema de abrazaderas en la unión de células prefabricadas de hormigón y confinábamos la resina con neopreno, que impedía su expulsión, se deformaba y garantizaba el perfecto contacto y carga de la resina (12) (fig. 16).

Pero, volviendo al tema central, ¿qué soluciones hay para compatibilizar algo que parece incompatible? ¿Cómo cargar una pieza pesada sobre una superficie de mortero de manera que su peso no expulse al mortero sino que, además, la pieza lo acompañe en su retracción?



18. Para reducir la dificultad del perfecto pulimento y de la planeidad de grandes superficies, la construcción griega redujo la superficie de contacto a una banda, normalmente perimetral: la "anatyrosis" (figura de R. Martín).



19. La planeidad de algunos elementos de gran superficie exigía enormes trabajos y un perfecto control. Para esto último se recurría a reglas de hasta 7 m de longitud, manchadas con sanguina que, al resbalar sobre la obra, debían manchar toda la superficie de la anatyrosis. Los pliegos de condiciones fijaban la frecuencia con que esta regla debía cotejarse con el patrón, que se conservaba en el templo (dibujo de R. Martín).



20. El gran panel, como el sillar, debe depositarse sobre un lecho de mortero. Estas cuñas de madera impedían, en el sistema Casamitjana de Cerdanyola, la expulsión de la pasta antes de su fraguado.



21. En el sistema Tracoba, utilizado en Ciutat Badia (Cerdanyola) y en Alcalá de Henares, el apoyo provisional del panel superior se hacía sobre unos tapones de aluminio que, a su vez, se colocaban sobre tubos metálicos, como los que asoman en las testa de este panel de fachada de la escalera.

La cantería griega

Existe una primera solución con un importante precedente histórico: el de la perfección griega (fig. 17).

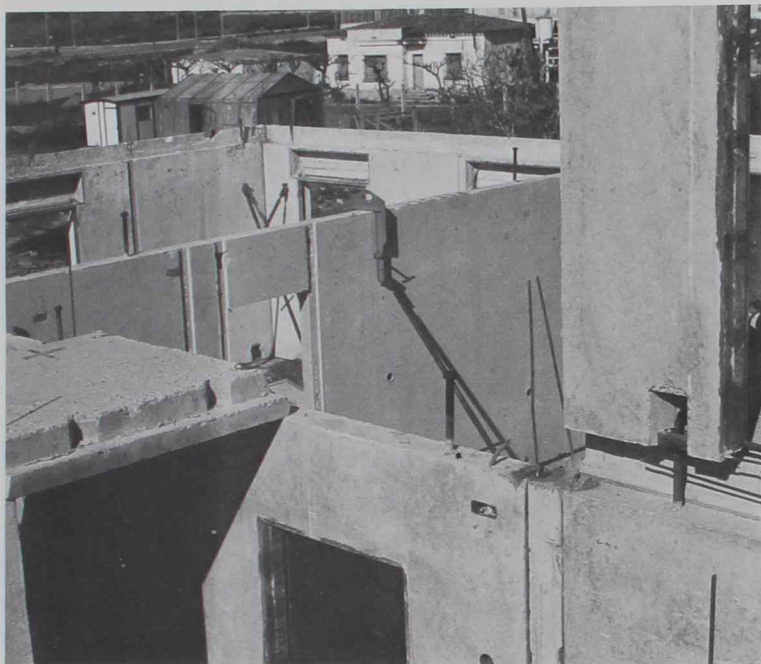
Si se puede conseguir que la cara de la pieza entre en contacto con el lecho en toda o en la mayor parte de su superficie, no será necesario interponer mortero. Este es el caso de la construcción griega. Las piedras se pulían, probablemente, contra su propio lecho hasta asegurar el contacto en una amplia superficie de sus caras, que llamaban "anatyrosis" (fig. 18). Ese área a pulir estaba ya destacada en relieve en el sillar antes de su puesta en obra y se pulía hasta garantizar la planeidad de toda una hilada. Para el control de la planeidad de la superficie formada por varias "anatyrosis" se usaban reglas de hasta 7 m, embadurnadas con sanguina (fig. 19). Si al pasarla sobre la superficie quedaba alguna zona sin pintar, debía rebajarse el resto de piedras de la hilada hasta conseguir la más absoluta planeidad. Esta operación debía repetirse varias veces, porque hay pruebas de pulidos sucesivos para rebajar hasta 3 cm de espesor de mármol (13). Hoy, a pesar de las estrechas tolerancias de nuestros sistemas industrializados, esa planeidad es imposible. En cambio, con

las almohadillas de neopreno, capaces de transmitir grandes compresiones y de sufrir deformaciones perfectamente controlables, se ha hecho fácil evitar el apoyo puntual de superficies muy cargadas. Sin embargo, el problema subsiste cada vez que queremos interponer en una junta un pegamento o aglomerante que no deba ser expulsado por la carga.

En esa situación quedan dos soluciones: el confinado elástico del fluido con neopreno, como hemos visto más arriba, o más corrientemente moviendo las piezas superiores para seguir a los morteros y hormigones en sus deformaciones.

Veamos, por ejemplo, el caso de los grandes paneles de hormigón. Para evitar que cada panel sólo se apoye en un par de puntos de la superficie inferior y que, por tanto, se parta en dos al recibir toda la carga, se han utilizado toda clase de técnicas: desde las tradicionales cuñas descritas por Serrallach y usadas todavía hoy por uno de los pocos supervivientes de la construcción de grandes paneles que quedan en Catalunya (fig. 20), hasta las más sofisticadas técnicas contemporáneas. (14)

El objetivo fundamental es acompañar el mortero en su



23. Viviendas construidas en Tarragona por la empresa Cidesa con una correcta adecuación del sistema danés Larsen & Nielssen.



retracción y no cargarlo mientras está fresco. Pues bien, esto se puede conseguir por la deformación de los calzos o por un movimiento voluntario provocado por el constructor. En el primer caso, se utilizan calzos que se romperán cuando la carga alcance valores controlados que, conocido el ritmo de la obra, aseguran que ha transcurrido un tiempo suficiente para que se haya endurecido el mortero. Esos calzos de rotura controlada pueden ser más o menos sofisticados. En una versión "sui generis" del sistema francés Estiot, que se usó en España al final de los años 60, se usaron como calzos unos tacos de hormigón pobre. La solución era pésima porque no se podía controlar la rotura de ese hormigón, zunchado por el resto del hormigón de la junta. Mucho más perfectos eran los tapones de una aleación de aluminio usados en el sistema Tracoba (fig. 21).

La segunda línea de soluciones es la más utilizada actualmente. Se basa en el apoyo de un panel sobre otro mediante espárragos roscados de manera que, cuando el fraguado se ha realizado, sea accesible la rosca que soporta el panel superior y se pueda aflojar hasta que éste repose sobre el lecho de mortero ya retraído (fig. 22 y 23).

Estos sistemas ofrecen la garantía de un apoyo perfecto, puesto que la superficie retraída ha sido moldeada por la colocación de la pieza superior, por lo cual, se adapta perfectamente a sus irregularidades.

Todas estas técnicas, nuevas o antiguas, tienen, pues, un solo objetivo: garantizar la distribución homogénea de las compresiones en las superficies de contacto (Exigencia IV).

Exigencias que dependen del elemento constructivo a realizar

Evidentemente, todas las piezas deben tener la forma y posición exactas que se definen en el proyecto, pero estos cuidados son especialmente importantes cuando se trata de elementos constructivos verticales, esbeltos y cargados.

Las recomendaciones del CEB, por ejemplo, establecen límites a:

- Los errores de forma de la pieza: el plano mecánico medio de la pieza real debe diferir del teórico en menos del 4% del espesor (R 44.421 del CEB).
- Los errores de posición: el descentramiento entre dos paneles



22. Los sistemas más modernos apoyan los paneles en un perno roscado que sobresale del panel inferior. El mortero que rellenará esa junta no se comprime hasta que no se afloja la tuerca (Sistema Jespersen).

superpuestos no debe ser de 15 mm si el inferior es visible y de 25 mm si es invisible (R 44.423 del CEB).

- Los errores de verticalidad: en un panel, no se permiten desplomes de más de 1/500 de la altura (R 73.2 del CEB).

La verticalidad de los paneles será, pues, la nueva exigencia (V) que el papel portante añade a las ya establecidas de forma y posicionado.

Por tratarse de elementos que conforman el espacio habitable es lógico que además se les exija cierta planeidad. La norma del CEB (R 44.422) fija la tolerancia en 3/1000 de la altura, atendiendo, sobre todo, a los aspectos de capacidad portante de la pieza.

Cuando las uniones entre paneles tienen que soportar esfuerzos distintos de las compresiones, su diseño se vuelve más complejo y es necesario prever dentados o ensamblajes especiales si se confía en la geometría de las mismas piezas, o bien recurrir a otros materiales y técnicas, como el solape, el soldado, el roscado de armaduras, el postensado, etc. Cada una de estas técnicas plantea sus exigencias específicas, que no podemos recoger aquí. Estos problemas se agudizan cuando se tratan componentes lineales en que el contacto entre piezas se reduce a un solo punto al que se confía la transmisión de toda clase de esfuerzos. Trataremos este problema en otro lugar cuando estudiaremos las estructuras porticadas.

Técnicas de ejecución con grandes paneles

El sistema de ejecución con grandes paneles se basa en la producción industrializada de estos componentes que después serán transportados hasta el lugar de construcción del edificio para ser ensamblados unos con otros. Así pues, hay una independencia de tiempo y de lugar entre la fabricación y la construcción, lo que diferencia esta técnica del conjunto de las técnicas "in situ" que hasta ahora hemos descrito. Haremos el análisis de la puesta en obra a partir de los tres momentos significativos del proceso: la fabricación, el transporte y el montaje.

Fabricación

Según las proporciones de la obra, la fábrica se montará: a) a pie de obra y para una operación concreta (grandes conjuntos de 5.000, 10.000 o más viviendas, como en el caso de Ciutat Badia i Bellvitge, en Barcelona, o bien en el caso de Thamesmead, cerca de Londres); b) en un lugar fijo desde donde distribuya su producción entre un conjunto de obras medianas (300 o más viviendas), situadas en el radio de acción del medio de transporte elegido.

La primera etapa del proceso consiste, como decíamos, en la fabricación de componentes. Como el material básico es el hormigón, el proceso de fabricación de los componentes en el taller seguirá las etapas que hemos visto para el caso de los materiales amorfos, es decir, preparación de moldes,

hormigonado y curado. Aparece, además, una nueva etapa, interpuesta entre la fabricación y el transporte, que es el almacenamiento.

Dentro de la primera etapa se distinguen dos momentos significativos: en primer lugar, la limpieza del molde y la aplicación del líquido desencofrante que facilitará la separación de la pieza, ya fraguada, del molde; en segundo lugar, la introducción en el molde de todos los elementos necesarios para que la pieza pueda cumplir la función para la que ha sido proyectada: colocación de reservas (puertas, ventanas, insertos de transporte, etc.), de instalaciones (eléctricas, etc.) y de armaduras. Una vez listo el molde para ser llenado de hormigón, se procede a esta operación, que empieza con el amasado previo en una planta centralizada de producción, donde se controlan perfectamente la cantidad de cada uno de los componentes según la dosificación, consistencia y resistencia señaladas en el proyecto. Este hormigón se transporta por medio de vagonetes, que circulan por carriles elevados, hasta los diferentes lugares de la fábrica donde están los moldes. Se vierte y se compacta la pasta (Exigencia II de los materiales amorfos) mediante el vibrado superficial (regla vibradora) en la masa (vibrador de aguja), o en el molde (bandeja vibradora). Para hacer más sencillos los trabajos de repaso y acabado de la obra, se procede al curado, mediante el cual se alcanza la resistencia necesaria para que la pieza hormigonada pueda soportar los esfuerzos a que será sometida durante la manipulación y el transporte hasta el almacén, donde continuará el proceso de curado hasta alcanzar la resistencia prevista.

Para amortizar el elevado coste del complejo sistema de moldes, la operación de curado se reduce al máximo, y se hace en una media de 6 horas. Es el tiempo necesario para que el hormigón adquiera, aproximadamente, el 60% de su resistencia final.

Los medios utilizados habitualmente son el vapor de agua a baja o alta presión, el calentamiento de los moldes o del agua del amasado. Estos medios tienden a aumentar la temperatura sin afectar al contenido de humedad del material a lo largo del proceso.

Cuando el hormigón tiene ya la resistencia prevista, se procede al desencofrado y al traslado al patio del almacén. Se utiliza un puente-grúa que recorre la nave desde el lugar de moldeado hasta el de almacenamiento.

Transporte

Cuando la programación de la obra lo tolera, los componentes se trasladan desde la fábrica con camión, gracias a la gran flexibilidad de este medio y a su coste controlable. Excepcionalmente, se ha utilizado el ferrocarril, e incluso el transporte fluvial, pero estos medios implican un recorrido fijo y, por tanto, limitan también la localización tanto de la fábrica como de la obra. Cuando la fábrica o el taller se encuentran a pie de obra, el transporte se reduce a una simple operación de traslado con la grúa desde la rima hasta el lugar que ocupará el componente en el edificio.

En el caso de transporte por carretera, se utiliza generalmente

una unidad de camión formada por un tractor y tres remolques de plataforma, de tal manera que, mientras en la fábrica se carga una plataforma (separada del tractor), en la obra se descarga otra, y la tercera circula de un lugar a otro arrastrada por el tractor; al mismo tiempo, en la obra, se coloca cada panel en su ubicación definitiva. Así, evitando los almacenamientos intermedios, se reducen los tiempos muertos del conductor y del camión y se minimizan los riesgos de descascarillados o de rupturas de los paneles. Con el mismo objetivo han surgido nuevos utensilios auxiliares del sistema de transporte, como los palets con soportes hidráulicos, que suben o bajan la carga y liberan rápidamente el camión.

Montaje

El montaje de paneles de hormigón supone un proceso que es común a todos los componentes, es decir, la preparación del soporte, la colocación y la unión. Sin embargo, por tratarse de elementos muy pesados, el proceso se hace más complejo a causa de los elementos que intervienen.

En el caso de paredes y fachadas, por tener éstas poco espesor, se añade el problema de la inestabilidad, por lo cual deben fijarse provisionalmente los componentes hasta que las uniones adquieran la resistencia necesaria, lo cual se consigue con el apeo de los elementos.

Lógicamente el orden del montaje empieza por los elementos verticales (paredes y fachadas) sobre los cuales se apoyan los horizontales (techos y escaleras).

Cuando se habla de preparación del soporte, se entiende fundamentalmente la nivelación de la base de apoyo.

Ejemplificaremos el proceso de montaje con la descripción de dos casos con un nivel tecnológico bien distinto:

En el primer caso (utilizado por la empresa Couspania), la nivelación se consigue colocando dos capas de yeso de escayola enrasadas por la parte superior y situadas a una distancia determinada una de otra, con lo cual se hace posible el correcto apoyo de la pared.

La colocación en situación de la pared se realiza a partir del replanteo de su trazado sobre el soporte. Es decir: se marca una línea de referencia con la cual deberá coincidir la cara del panel a colocar. Los errores de colocación en situación producidos por el uso de la cinta métrica o por la dificultad de situar correctamente un elemento que se tiene suspendido, con un peso de 4 a 6 toneladas, han hecho cambiar la técnica basada en las referencias visuales, las cuales se han sustituido por referencias físicas, fijadas previamente en el soporte contra el que se apoya el componente, al cual se hace bajar sobre el plano que deberá sostenerlo.

Antes de liberar al panel de las ligaduras con que cuelga de la grúa, se apea con puntales (fijados en el suelo y en el panel) que aseguran su estabilidad. Estos elementos son de tipo telescópico y, variando su longitud, se puede regular la posición del panel hasta que éste quede totalmente vertical. Una variante

del sistema de apeo es el método de colocar escuadras de una altura similar a la del panel, que sirven para colocarlo en situación, darle estabilidad y garantizar su verticalidad. Cuando se tiene el panel en su sitio, se procede a su unión con el resto del muro por medio del uso de uniones secas (soldaduras o fijaciones con tornillos) o de uniones húmedas, es decir, con aglomerantes hidráulicos, de uso más generalizado.

Para evitar que el apoyo del panel superior sobre el soporte (ambos rígidos) se produzca sólo sobre los puntos de irregularidad, deberá disponerse de una superficie de apoyo continua, para lo cual se interpone una capa de hormigón de poco espesor (2 cm) que no tiene función de unión por lo que respecta a la transmisión de esfuerzos de tracción, sino que sólo transmite las compresiones.

La junta se materializa al llenar completamente el espacio de separación que hay entre el panel y el soporte. Esta junta se ha conseguido apoyando el panel sobre los tientos de escayola ya fraguada. A pesar de ello, esta junta de hormigón verá reducido su espesor por efecto de la retracción de fraguado, lo cual provocará de nuevo que el panel repose sobre la escayola. Sólo un aumento de la carga que actúa sobre el panel, y por tanto sobre la escayola, producirá la ruptura de este material, evidentemente más blando, y el descenso del panel hasta apoyarse sobre la capa de hormigón ya fraguado y retraído. Este aumento de carga se produce al colocar el forjado superior o los paneles de la planta siguiente.

El proceso acaba con la colocación de las losas del techo y el hormigonado "in situ" de los puntos verticales (muro-muro, muro-fachada y fachada-fachada), con lo cual se obtiene un conjunto monolítico.

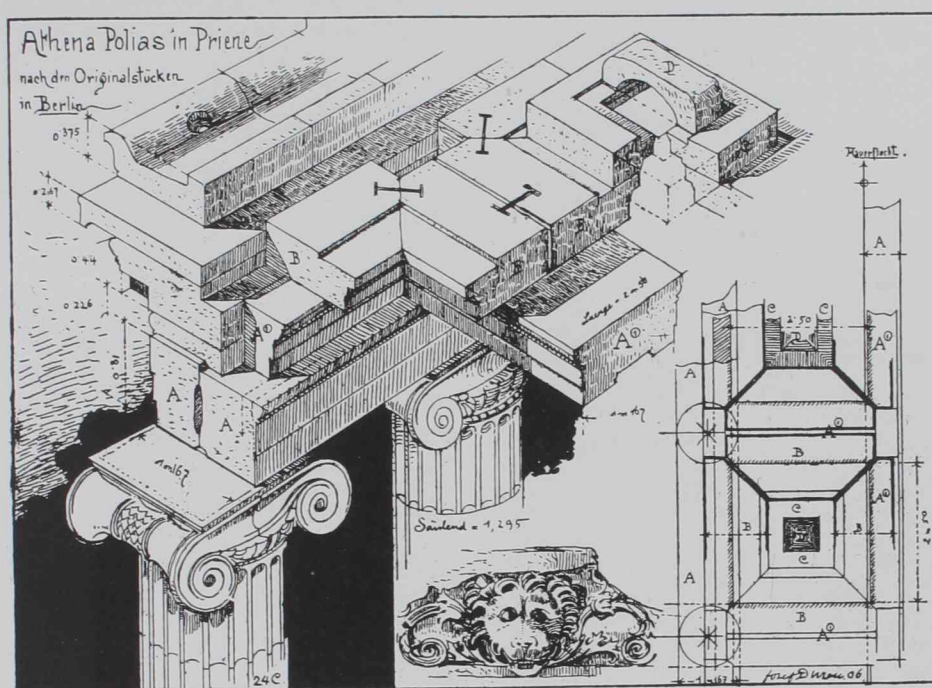
El proceso de montaje de los elementos horizontales es más simple que el de los verticales porque son elementos autoestables y, por tanto, no hace falta apearlos ni fijarlos provisionalmente, sino que se apoyan sobre los muros o las fachadas. Por otra parte, y según el grado de exactitud con que se fabriquen las piezas, se puede considerar que las caras

inferior y superior de los elementos verticales son paralelas y, por tanto, al estar nivelada la inferior (recordemos la primera etapa del proceso), también debería estarlo la superior. Si el nivel tecnológico del equipo de fabricación no garantiza este paralelismo, deberá repetirse la operación de nivelación para poder colocar los forjados. Para ello deberá retacarse la junta entre la parte superior del muro y el forjado, como se ha explicado para la unión inferior del panel.

Un ejemplo, tecnológicamente más avanzado, es el sistema Modulbeton, que pertenece a la llamada segunda generación de sistemas de grandes paneles, constituida por patentes de origen nórdico i extendida más tarde a toda Europa. Este sistema sustituye los soportes de escayola, utilizados para la nivelación y el descenso del panel, por un sistema de barras roscadas ancladas en la armadura del panel inferior; por la barra se desplaza una tuerca hasta encontrar la misma posición que las demás tuercas del sector de obra que se construye. En el plano horizontal así formado se apoyan los paneles verticales a través de un pletina perforada colocada en su cara inferior. Para colocar en situación este panel no se utiliza ni el sistema de replantear ni el sistema de tacos físicos, porque la introducción de las barras del panel inferior en los agujeros de la pletina del panel superior asegura que la posición de uno sobre otro es la correcta. Este tipo de sistemas que sólo permiten una posición (a diferencia del sistema de replanteo) se llaman de "posición forzada".

El descenso del panel vertical por ruptura de los soportes de escayola del ejemplo anterior, es sustituido aquí por el descenso de las tuercas. Esta operación debe hacerse cuando el mortero retacado entre el panel y el forjado ha sufrido ya la retracción de fraguado. La imposibilidad de efectuar un control estricto del descenso de las tuercas y, por tanto, del panel, hizo adoptar la técnica de colocar entre la tuerca y la pletina una arandela de neopreno que, con su deformación, permitiera el descenso del panel cuando aumentaran las cargas, sin que fuera necesario volver a manipular las tuercas.

El resto de operaciones (apeo, hormigonado de juntas, etc.) es similar al descrito en el caso anterior.



1. Este grabado de Durm muestra el papel de las grapas metálicas en la cantería griega como elementos de fijación a los que se encomiendan las tracciones entre piezas. Por su forma, las grapas convierten esas tracciones en compresiones ejercidas en el seno de los bloques pétreos.

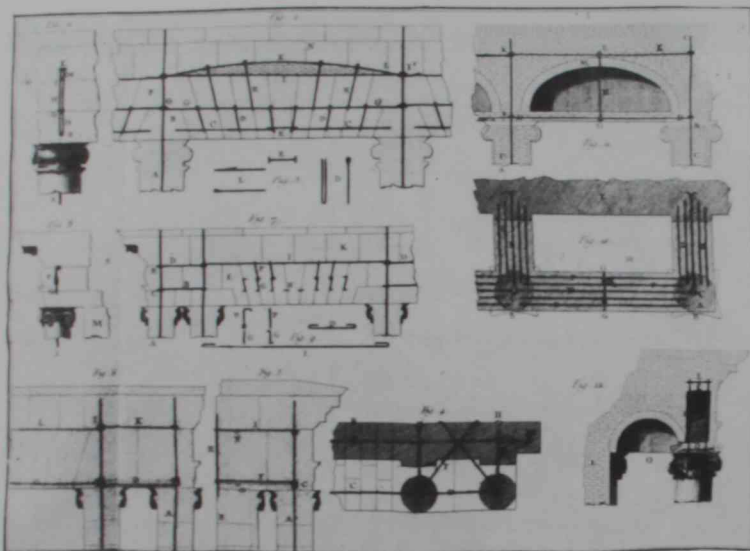
Como vimos en el capítulo IV, la fijación es una técnica de unión localizada que, a diferencia de la adición, no altera intrínsecamente las cualidades de los componentes que une. Si en el caso de la adición, el buen comportamiento del elemento final dependía del baño completo de las piezas dentro del material aglomerante, aquí el incremento del tamaño de éstas y lo reducido de los puntos de unión requerirá de la unión unas exigencias más difíciles de satisfacer. Dos de ellas tienen especial importancia para nosotros: por una parte, la concentración de tensiones, y por otra, la exigencia de deformaciones diferenciales que supone el mayor tamaño de los componentes y, sobre todo, su heterogeneidad.

El problema de las tracciones

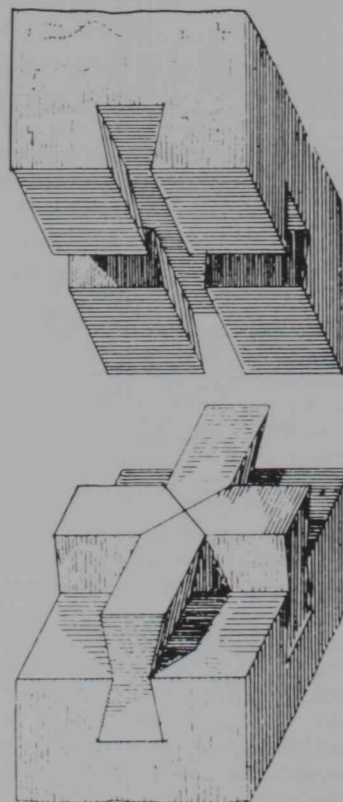
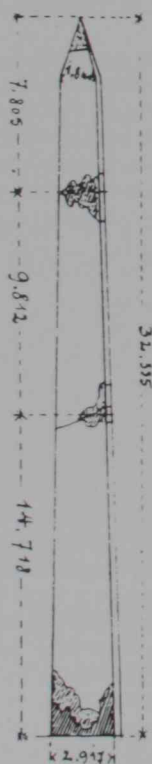
La concentración de tensiones en los puntos de fijación es especialmente problemática por lo que respecta a la presencia de componentes de tracción, siempre difíciles de asimilar con las técnicas tradicionales. Por ello, desde hace siglos, se utilizan fijaciones como complemento de la adición en casos como la sillería, en que la función adherente del aglomerante no es significativa. Las grapas metálicas entre sillares aparecen constantemente a partir de la construcción griega, en la cantería hecha para durar. Las formas más diversas responden a los distintos problemas de ejecución o de comportamiento (fig. 1). Cuanto más se fuerza el

comportamiento de la sillería, más complejos son los sistemas de fijación que llegan a conformar verdaderos armados (fig. 2).

La inserción de un material específico para asumir las tracciones siempre produce problemas, como la rotura de piezas por presiones muy puntuales, la entrada en tensión de la fijación dentro del hueco previsto, el comportamiento diferencial del material y, sobre todo, su durabilidad en los casos más frecuentes de recurso al hierro o a la madera. Por ello, cuando la construcción ha llegado a las soluciones más perfectas, ha confiado exclusivamente en la geometría. Si el aglomerante no garantiza la asunción de tracciones, lo que se puede hacer es conformar las piezas de manera que la junta esté siempre comprimida y tallarlas tan perfectamente que su encaje no permita ninguna deformación y toda la superficie de contacto lo sea realmente. Esta técnica es la habitual en el ensamblaje de la madera, que en este texto no trataremos. La cola de milano, caja y espiga, rayos de júpiter, etc. son formas de adecuar la junta a distintos tipos de sollicitación, minimizando las juntas traccionadas. Si estos ensamblajes están hoy en desuso es porque la relación de coste entre el trabajo artesano y el coste del material se ha alterado radicalmente. Pero en el contexto económico que les dió origen, estas soluciones geométricas representaban una de la más brillantes acumulaciones del saber universal en materia de construcción.



2. El grabado de Pate del frontón del Louvre es el ejemplo clásico de uso intensivo de elementos metálicos para asumir tracciones. Su papel es de tal importancia que se puede hablar de cantería armada.



3. El obelisco de S. Pedro es un ejemplo de trasposición a la piedra de las técnicas de ensamblaje. La unión de los enormes fragmentos del fuste se hizo con estas piezas en forma de cruz con sección en cola de milano (Domenico Fontana, 1588).

La transposición de estas técnicas a la cantería se ha hecho en la historia de la construcción cada vez que las condiciones de comportamiento eran especialmente exigentes (fig. 3). Véase también el faro de Smeaton, (Cap. VII, fig. 7) y la cornisa del palacio Strozzi (Cap. V, fig. 8, tomo II).

La dificultad del trabajo artesano en esos ensamblajes, que consiguen transformar en compresiones, sobre elaboradas juntas, las tracciones que soportan los elementos, está llevando a su sustitución por formas de fijación que movilizan el rozamiento con las caras de los componentes para dar respuesta a esas tracciones. En este capítulo veremos su forma y su técnica de ejecución.

La libertad de movimientos

La heterogénea construcción contemporánea exige un comportamiento cada vez más complejo de las fijaciones que deben limitar ciertos desplazamientos, dejando absoluta libertad para que se produzcan otros que son deseables o incoercibles. El "empolion" y "polo" griego es un precedente curioso de este tipo de mecanismos (1) (fig. 4).

El caso más común de restricción parcial de los movimientos de un elemento constructivo es el de elementos verticales no cargados, respecto a los cargados. Para evitar el vuelco de los primeros al ser afectados por los asientos y las cargas de los segundos, el mejor recurso es, como siempre, la geometría. Desde Karnak hasta los textos de Serrallach (véase capítulo III), el machihembrado de la unión entre los elementos cargados y no cargados garantiza la libertad de las deformaciones verticales y asegura, además, la estabilidad contra posibles vuelcos.

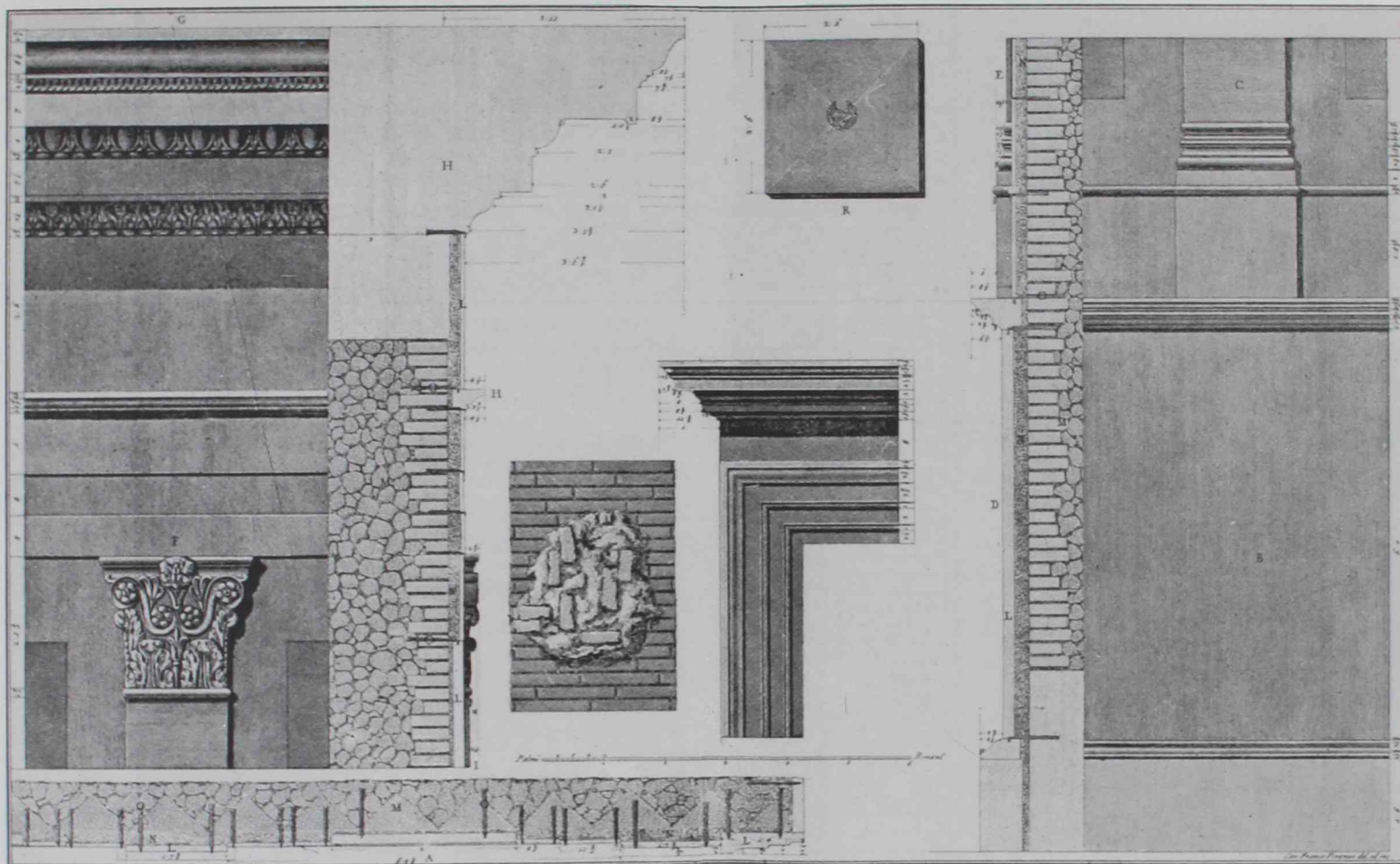
El gótico, la "high tech" de la historia, es el maestro de este planteamiento que extrapola el esquema estructural global de la gran catedral. Desarrollaremos ampliamente este tema en otro tomo de este texto.

Un elemento constructivo delicado donde convergen estos problemas es el chapado. La construcción clásica comprendió claramente la importancia de no implicar a los rígidos revestimientos marmóreos en el descenso de cargas y para ello los fijó con grandes grapas una vez acabada la obra (fig. 5).

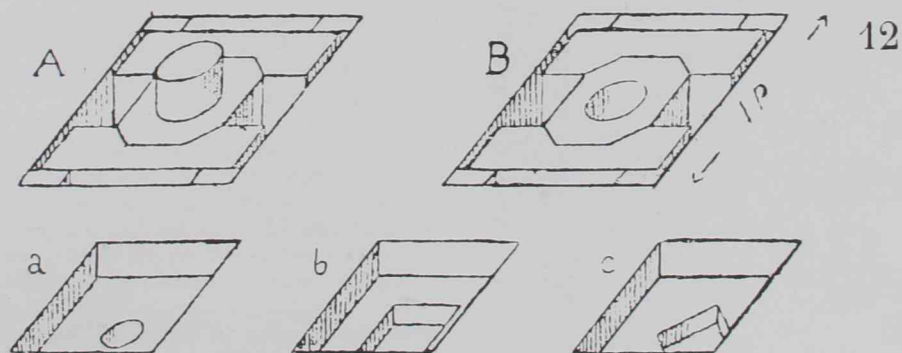
En los palacios renacentistas se solían dejar reservas en la mampostería para empotrar los revestimientos cuando la obra estaba acabada (2). La utilización de piezas del mismo material como fijación conforma el despiece del revestimiento (fig. 6). Las grandes piezas planas se mueven entre las bandas empotradas en la obra.

A lo largo del siglo XIX, se perdió esta tradición y se utilizó cada vez más el revestimiento amortiguado, en que la fiabilidad de la adherencia es muy discutible.

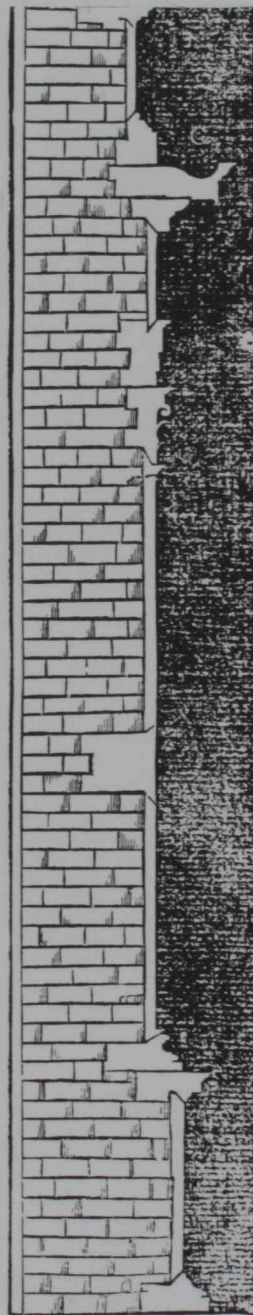
La solución más habitual para la fijación de ciertos grados de movilidad es el recurso a materiales específicos, generalmente metálicos, con un diseño adecuado al comportamiento que se les exige.



4. El grabado de Piranesi muestra los anclajes metálicos que fijan los mármoles de chapado en el Panteón de Adriano.



5. Una de las características de las fijaciones más modernas es la de limitar sólo algunos grados de libertad de movimientos entre los componentes. Este sofisticado pasador limita sólo el desplazamiento entre dos tambores de una columna griega. En el cuidadosísimo diseño se evidencia la previsión del entumecimiento de la madera que podría partir la piedra; de ahí el mecanismo de piezas que hacen de caja de la espiga vertical y permiten un aumento de volumen.



6. Durante el renacimiento fue habitual utilizar bloques de la misma piedra como soporte de los chapados. Las tiras de piedra conformaban el dibujo de la fachada. Aunque habitualmente la inserción de las piezas de soporte se hacía con la obra acabada, este grabado de Serlio plantea dudas sobre la independencia del chapado.

El ventanal gótico es un curioso precedente de este recurso a las fijaciones de diseño especializado. Unas cuñas metálicas entran en agujeros colisos de unas patillas solidarias con la armadura. Entre la cuña y la armadura, el vidrio emplomado puede sufrir importantes dilataciones térmicas sin violencia especial. La presión puede graduarse introduciendo más o menos la cuña. La fijación es absolutamente reversible y permite reparar el ventanal emplomado (fig. 9, cap. II).

Actualmente, existen en el mercado formas sofisticadísimas de fijación para permitir o fijar cualquier tipo de movimiento (fig. 7). El caso más complejo es el del muro cortina, que debe fijarse a una estructura elaborada con una tecnología imprecisa. La fijación debe asumir todas las tolerancias y permitir los movimientos térmicos o mecánicos del muro en su plano, y debe limitar los perpendiculares al mismo provocados por inestabilidad, acciones eólicas, etc. (fig. 8).

En este contexto, pues, vamos a introducir la técnica disponible para que estos sofisticados mecanismos se anclen sobre un soporte.

Aspectos definitorios de las fijaciones

Analizaremos, fundamentalmente, las fijaciones más sencillas, las que unen una pieza a un elemento previo de la obra al que llamaremos soporte o base. La dificultad fundamental que debe salvar este tipo de uniones es la capacidad de soportar tracciones. Éste será, pues, uno de los aspectos fundamentales de su estudio, y su tipología nos permitirá una primera clasificación, según se recurra al rozamiento entre fijación y base, a la transformación de esa tracción en compresión gracias a la forma especial del contacto, a la adherencia de determinados productos químicos, etc.

Pero, puesto que nuestra aproximación es fundamentalmente tecnológica, es decir, nos interesa sobre todo el proceso de puesta en obra, distinguiremos tres técnicas fundamentales de anclaje, de unión de la fijación al soporte: dos de ellas son idóneas para los materiales conformados, y son la del desplazamiento del material y la de la extracción del mismo; la tercera es específica de los materiales amorfos, y es la de la inserción de la fijación en la pasta durante el moldeado. Esta doble tipología establece la clasificación básica de las fijaciones.

Así, entre las técnicas en que la fijación se introduce dentro del soporte desplazando el material de base, distinguiremos el clavado y el atornillado. El primero resiste las tracciones simplemente por rozamiento de la fijación y la base; el segundo introduce una lámina espiral dentro del material que transforma la tracción sobre el tornillo en compresión sobre la base.

Entre las técnicas de extracción de material de la base, la adherencia de la fijación puede buscarse por presión mecánica de la misma sobre la oquedad o por medio de adhesivos químicos. Llamaremos a los primeros tacos mecánicos y a los segundos tacos químicos.

Las inserciones pueden soportar las tracciones por los medios más variados según recurran a la forma para transformarlas en compresión sobre la base, a la adherencia del aglomerante del material de soporte o, en fin, a la soldadura de armaduras y elementos metálicos.

El clavado

Es probablemente la técnica de fijación más antigua y más utilizada en la construcción. Se conocen clavos caldeos de cobre del año 3.000 a.C. y su uso se ha incrementado a lo largo de la historia. Hoy, se utilizan tanto para fijar elementos acabados (entaramados) como en los trabajos auxiliares de la obra (encofrados).

El material ideal como base del clavado es la madera porque permite la fácil entrada del clavo por desplazamiento de fibras y, gracias a su elasticidad, ejerce posteriormente una firme presión sobre el mismo. Su extrapolación a materiales más duros ha llevado al uso de pistolas que disparan los clavos por la fuerza impulsora de cartuchos de pólvora. La técnica del disparo es especialmente útil para fijaciones sobre hormigón. En realidad, en este caso, la adherencia clavo-base obedece a mecanismos más complejos, puesto que la energía disipada por el frenazo del clavo produce cambios químicos en el hormigón, que aumentan notablemente la cohesión entre ambos.

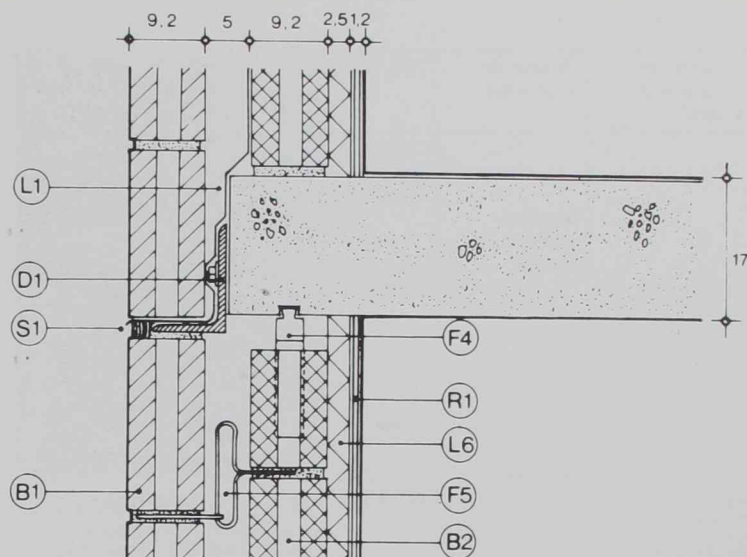
Puesto que la eficacia de la fijación es función de la adherencia y ésta, a su vez, depende de la superficie de contacto entre clavo y material de base, es lógico que siempre sea preferible utilizar un mayor número de clavos pequeños que uno grande de sección equivalente. Además, de esta manera, el desplazamiento lateral de las fibras es menor. Como respuesta a esta ventaja y para mecanizar el trabajo hasta hoy artesano del clavado, han surgido las placas de metal desplegado. Estas placas de metal desplegado se adaptan a las funciones más variadas y hacen que el clavado sea sencillísimo y de gran eficacia.

El atornillado

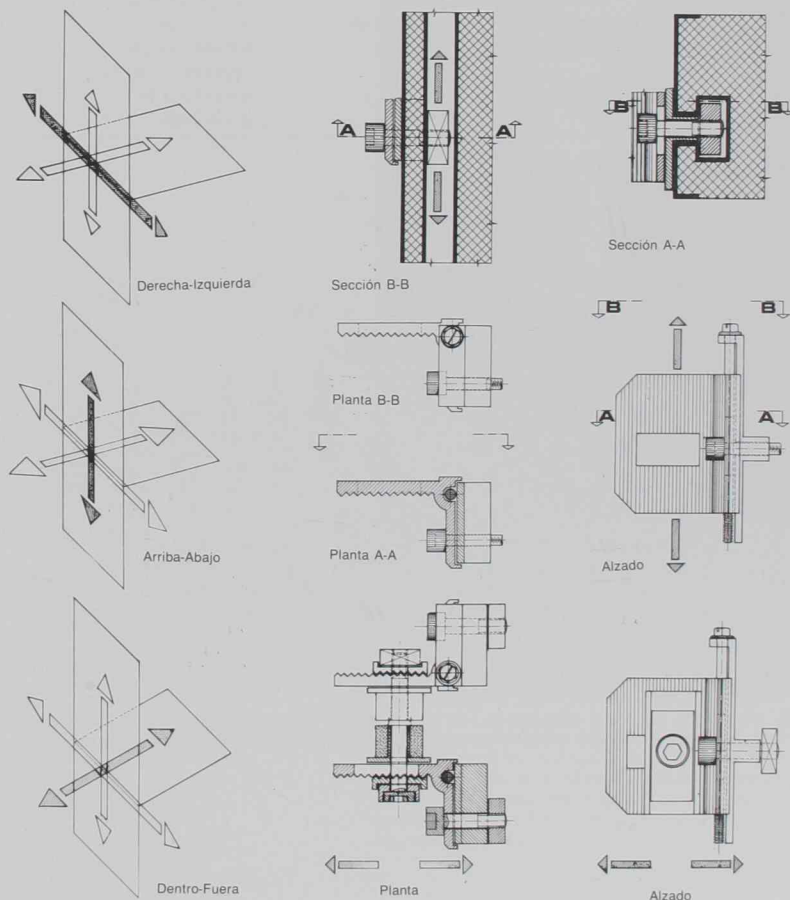
Aunque el principio del tornillo es conocido desde hace muchos años, las herramientas de corte no se perfeccionaron lo suficiente hasta el siglo XVIII como para permitir su producción en masa.

Desde esta fecha, el tornillo ha tenido un éxito amplísimo, sobre todo en la industria. Nos referimos solamente a los tornillos utilizados en la construcción y especialmente a los que no tienen hembra, sino que hunden su espiral directamente en el material de base.

La tendencia a la mecanización de todos los procesos está introduciendo máquinas de atornillar de presión controlada que se desembragan cuando la presión puede dañar el material de base o introducir demasiado el tornillo (fig. 10). Todo lo contrario es la incomprensible tendencia actual de clavar los tornillos con martillo en casi toda su longitud para aplicar al final sólo un par de vueltas de destornillador. Esto reduce la



7. La heterogeneización de la construcción y los saltos térmicos entre capas, favorecidos por eficaces aislamientos, exigen fijaciones cada vez más complejas, como las de esta fachada de J.L. Sert.



8. La unión del torjado y el muro cortina, con sus complejos movimientos y sus exigencias de tolerancia dimensional, es el caso más difícil de la fijación (Edificio Pirelli de Milán).

Forma del material de base	Técnica de colocación	Tipo de fijación	Forma de transmitir las tracciones
Conformado	Desplazamiento del material	Clavos de tiro Placas de clavos	Por fricción
		Tornillos	Transformándolas en compresiones por geometría
	Extracción del material	Tacos mecánicos	Por fricción incrementada por presión
		Tacos químicos	Por adherencia del producto químico
Amorfo	Inserción del material	Inserciones	Transformándolas en compresión por geometría además de la adherencia de fraguado o la soldadura de armaduras

resistencia a la tracción del atornillado que, si se efectúa correctamente, es tres veces superior a la de un clavado de diámetro equivalente.

Los tacos mecánicos

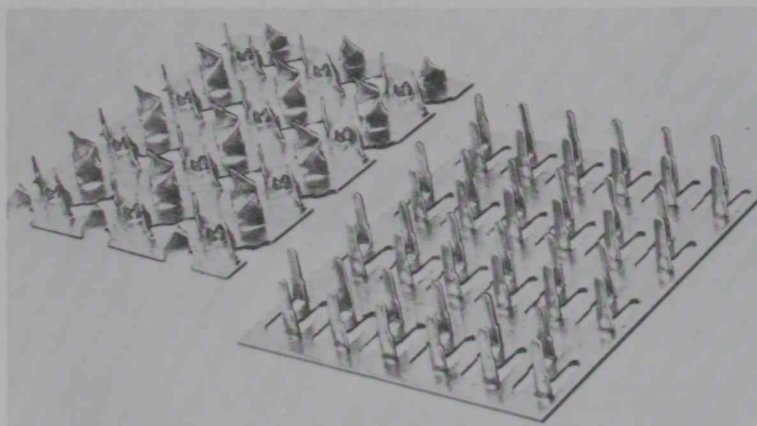
Cuando el material de la base no es capaz de garantizar una reacción ante la penetración que asegure una fuerza de rozamiento capaz de soportar las tracciones exigidas, es necesario tomar la iniciativa y que sea la fijación la que presione sobre el soporte. Esto es lo que llamamos tacos mecánicos. Tacos, porque recuerdan los tarugos trapezoidales de madera que se introducen en el yeso o en el mortero para servir de base a clavos o tornillos; mecánicos, para distinguirlos de aquéllos y llamar la atención sobre el esfuerzo mecánico que hay que ejercer sobre la base para substituir al que, en el clavado, ejerce ésta sobre el clavo.

La técnica del taco mecánico abarca un campo amplísimo que va desde el "bricolage" casero hasta la unión estructural de grandes paneles. Evidentemente, los mecanismos de la expansión son diferentes. En los tacos sencillos, el tornillo penetra dentro de un material relativamente dúctil, como el plástico, y lo presiona contra el soporte. La fuerza de la expansión es la que transmite el destornillador. En los tacos pesados, metálicos, todo el elemento de fijación se introduce dentro de la oquedad practicada en el soporte. Dicho elemento está formado por un perno roscado enfundado en una hembra formada por varias piezas que se abren en forma de trípode por el desplazamiento de un cono que a su vez es movido por el giro del perno. Las piezas articuladas que forman la hembra envolvente presionan las paredes del soporte e hincan en ella los relieves que llevan grabados consiguiendo, así, una notable adherencia. Tacos de este tipo sobre hormigón pueden soportar tracciones de varias toneladas (fig. 11).

Los tacos químicos

En algunos casos, la adherencia conseguida por el sistema anterior no es suficiente, quizá porque el material de base es muy heterogéneo o quizá porque puede sufrir pequeñas roturas internas posteriores al ejercicio de la presión, lo que dejaría al taco sin adherencia. Éste es el caso de algunos hormigones de áridos ligeros. En este caso, puede ser conveniente el uso de los tacos químicos. Una vez efectuada la perforación previa, se introduce en ella un cartucho que contiene, en cavidades separadas, una resina de poliéster y un catalizador, que envuelven el anclaje (generalmente un vástago corrugado). Se golpea contra el fondo de la cavidad y la rotura del cartucho provoca la mezcla de los componentes, formándose el adhesivo que llena la oquedad y que une el vástago con el soporte.

Los tacos químicos aparecen, pues, como una solución adecuada a fábricas antiguas de composición imprecisa. Son por ello muy utilizados en obras de reparación.



9. Las placas de metal desplegado, de uso cada vez más frecuente para la unión de maderas, son un ejemplo de los modernos sistemas de fijación con desplazamiento.

Las inserciones

Pero, evidentemente, la solución más segura para soportar las tracciones es la inserción de la fijación o de una parte de ella en un material amorfo. En sus formas más sencillas, se ha usado siempre en la construcción tradicional, tanto en el caso de los tacos de madera inmersos en yeso o mortero que citábamos antes, como en la inserción de grapas de anclaje de la carpintería en los tendeles de la obra de la fábrica.

En su versión industrializada, esta técnica supone la inmersión en el material amorfo, tanto si se trata de un forjado de hormigón encofrado en obra como de un gran panel en fábrica, de un anclaje, sea en forma de hembra o no, al que después se acopla el resto de la fijación. Como es lógico, las formas que esta fijación puede adoptar son variadísimas según el grado de libertad que se quiera dar a la pieza fijada.

La parte inserta en el material amorfo queda unida a éste, en los casos más sencillos, por simple geometría: es el caso del taco de madera en forma de pirámide truncada con la base hacia dentro.

En los casos más importantes hay que recurrir a elementos metálicos soldados a las armaduras de hormigón (fig. 12).

Exigencias que dependen de la forma del material

Las técnicas que hemos estudiado hasta ahora eran adecuadas específicamente para materiales de una forma determinada, y esa condición planteaba algunas exigencias específicas a la tecnología. Las fijaciones, por el contrario, se aplican sobre materiales de cualquier forma, y por ello este aspecto no puede definir ninguna exigencia genérica a todas ellas, aunque, como veremos, matiza notablemente las exigencias que plantearemos a continuación.

Exigencias que dependen del proceso de puesta en obra

Una fijación bien proyectada sobre el plano puede fracasar estrepitosamente a la hora de la puesta en obra si no se ha previsto su facilidad de montaje, y ello en la doble vertiente de rendimiento de la mano de obra y eficacia final de la unión.

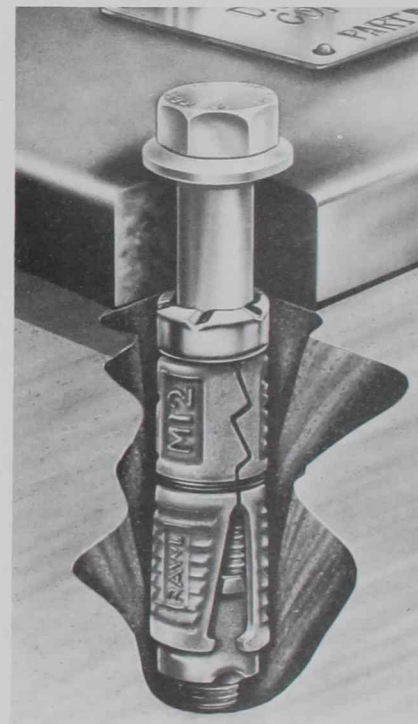
La condición de accesibilidad tiene íntima relación con otra condición que se estudia más adelante, que se refiere a la tolerancia, y establece un margen dimensional en la situación de la fijación a fin de evitar que el operario que debe ejecutarla desista de ello, por encontrar dificultades de acceso al punto de trabajo o por resultar incómoda la posición que debe adoptar.

Como norma general para todo tipo de uniones, es recomendable, si no se puede evitar un punto de fijación poco accesible, realizar la unión en taller, si se trata de elementos o componentes cuya definitiva puesta en obra lo hace posible.

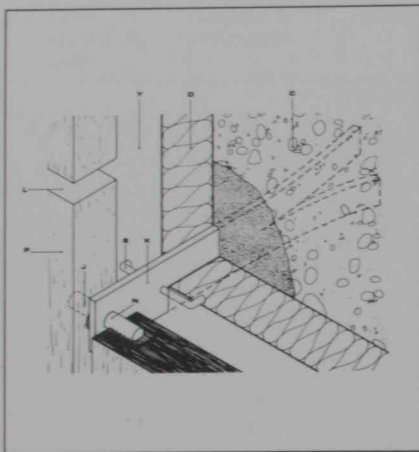
Deberán evitarse en obra las uniones "de techo" o "sobre la cabeza" (fig. 13), es decir, aquellas que exigen un esfuerzo adicional contra la ley de la gravedad. Estas uniones deberán



10. Para el atornillado de alta resistencia se recurre a herramientas de aire comprimido, que se desembragan al llegar al esfuerzo deseado.



11. Espectacular taco mecánico del Rawlplug. El taco mecánico consigue la resistencia a la tracción gracias a la cizalladura, que es capaz de soportar la superficie de contacto taco-soporte, altamente comprimida por la expansión del primero.



12. En la inserción, la fijación queda moldeada dentro de la masa del soporte. Este es el caso del soporte de un revestimiento de piedra inserto en un muro de hormigón.



13. En todos los casos, la ejecución de fijaciones en posturas difíciles o en lugares inaccesibles puede poner en peligro la calidad de las mismas.

hacerse en taller, aunque para ello sea preciso diseñar los componentes con una forma y tamaño distintos de los que tendrían en su posición definitiva en obra.

Podemos resumir, pues, esta exigencia como la de las previsiones que tienden a posibilitar el proceso de ejecución (exigencia I).

Por otra parte, debe tenerse en cuenta que la mayor parte de las técnicas de fijación citadas son agresivas para el material de base. Desplazar las fibras de la madera, agujerear la estructura del hormigón o perforar cualquier base para extraer material son tratamientos notablemente agresivos que deben ejecutarse con precaución (fig. 14).

Sea definitiva o reversible la fijación, el componente y la base han de mantener su estructura y propiedades originales, lo cual es condición indispensable para garantizar su durabilidad.

Para ello deberán utilizarse los elementos y medios de fijación adecuados y se atenderá escrupulosamente al número de puntos de fijación y a su espaciamiento en el proyecto o en las especificaciones.

Como ejemplos pueden citarse los casos de fijación de los paneles de cartón-yeso a los soportes metálicos o de madera que constituyen el entramado portante del tabique.

Todo ello puede resumirse en la exigencia de no dañar los elementos que hay que fijar.

Exigencias que dependen del elemento constructivo a realizar

La fijación debe evitar introducir en la unidad de obra resultante cualquier esfuerzo o deformación así como cualquier ligazón-puente que afecte a su resistencia o a su exposición a la intemperie.

A través de una fijación, no se debe hacer solidario un revestimiento con la estructura portante si ésta puede sufrir deformaciones tales que aquél no pueda soportar. Es el caso de un tabique cuya rigidez sea incompatible con las flechas admisibles en los forjados. Por ello, tanto los tabiques húmedos o tradicionales como los realizados con el empleo de componentes, exigen, en su unión con los elementos estructurales adyacentes, un tipo de fijación o unas precauciones especiales que impidan la acción sobre ellos de la estructura deformada.

La fijación tampoco debe constituir un elemento de transmisión entre el componente y la base que se han unido, de la acción de agentes exteriores, lo cual atentaría contra la durabilidad de uno de ellos o de los dos a la vez. Es el caso del panel de palastro, utilizado como revestimiento de la obra gruesa en una fachada y fijado a la misma mediante clavado o atornillado: si los materiales usados para dicha fijación no están convenientemente tratados para resistir las inclemencias atmosféricas y si además su forma no está diseñada de tal modo que geométricamente (no recurriendo a sellantes adicionales de dudosa eficacia) quede garantizada la

inactividad de la propia fijación como agente transmisor, la presencia del revestimiento así fijado tiene un efecto inverso al deseado.

Por otra parte, debe preverse un área de acción de la fijación suficientemente amplia, para absorber los posibles errores dimensionales de su ejecución. Es decir, debe existir una adecuación de la ejecución de la fijación y de su soporte a las tolerancias dimensionales permitidas por el tipo de fijación y por los sistemas de fabricación y puesta en obra.

Tal adecuación tiene un amplio margen de variabilidad. En el caso del clavado, el margen es amplio, pues suele ejecutarse en obra, lo cual elimina las dificultades de coincidencia entre las fases de preparación en taller y en obra. En el caso de una fijación por inserción, este margen se reduce notablemente por la propia naturaleza de la fijación.

Es necesaria, por tanto, la máxima precisión en la localización de la fijación (Exigencia III).

Por fin, debe tenerse en cuenta que la capacidad para soportar la tracción es la exigencia fundamental de este tipo de fijaciones (Exigencia IV). Como los mecanismos que en cada tipo de fijación garantizan la satisfacción de esta exigencia son muy diferentes, también lo serán las precauciones que en cada caso deben tomarse. En un clavado, deberá asegurarse la presión del soporte sobre el clavo. En el caso de la madera, por ejemplo, el tamaño de éste no será tal que las fibras se separen excesivamente. En el atornillado, se asegurará el trabajo de la espiral, por lo que deberán evitarse los martillazos. En el taco de expansión, hay que asegurarse que ésta se ha producido totalmente sin fisurar el soporte. En el taco químico será fundamental la limpieza del hueco, pues el polvo o la suciedad pueden impedir el contacto entre el adhesivo y la base. En el caso de la inserción, debe asegurarse la capacidad del hormigón y de su armadura para soportar la tracción.

La técnica de las uniones clavadas en la madera

Definición

Usadas preferentemente en las uniones madera-madera, constituyen un sistema clásico de enlace caracterizado por la enorme sencillez de su ejecución y la economía de madera (sobre todo comparándolo a otros sistemas como las ensambladuras), pues no exige, por lo general, el corte de la misma.

Se trata de una fijación que produce el desplazamiento del material al ejercer presión sobre el clavo que absorbe los esfuerzos de tracción por rozamiento con la madera, gracias a la estructura fibrosa y a la elasticidad de ésta, que, por otra parte, permiten la penetración del clavo.

Estas uniones pueden ejecutarse por solape de las piezas a unir o utilizando cubrejuntas sobre las piezas colocadas a tope.

Se utilizan todo tipo de clavos, que toman distintos nombres según su forma: puntas de París, alfileres, bellotes, tachuelas, calamones, etc. Se designan por su diámetro en décimas de mm y por su longitud en mm: un clavo de diámetro 3,4 mm y longitud 90 mm se designa 34 x 90.

El tipo, el número y la ordenación de los clavos son los parámetros que definen la fijación. El tipo se selecciona en función del espesor de la pieza más delgada y de la clase de madera empleada. La longitud del clavo depende también de aquel espesor y del tipo de unión.

Características

Los clavos de punta afilada tienen mayor poder de retención porque no destrozan las fibras de la madera al penetrar. Sin embargo, si la madera tiene tendencia a rajarse, un clavo de punta afilada acentuaría esta tendencia al separar las fibras.

El clavo despuntado reduce esta tendencia porque provoca aplastamiento en la sección de la madera a ocupar, pero destruye las fibras inmediatas.

En resumen:

Maderas frágiles, clavos despuntados.

Maderas blandas y homogéneas, clavos de punta afilada.

Cuando se ha clavado en madera verde, a medida que aumenta el secado, disminuye el poder de retención. La solución no está en remachar los clavos existentes, sino en sustituirlos por otros nuevos adecuados al tamaño de los orificios.

Resistencia de las uniones clavadas

La resistencia de una unión clavada se basa en el trabajo a esfuerzo cortante de los clavos y debe despreciarse el efecto de rozamiento por compresión entre las piezas unidas.

Para repartir las tensiones en las superficies de enlace, es preferible aportar la sección necesaria según el cálculo con un mayor número de clavos de diámetro pequeño que con menos clavos de diámetro grande.

La resistencia de la unión clavada es función del diámetro del clavo y de la densidad de la madera:

Resistencia a la extracción: $P_{ex} = K \times G^{5/2} \times d$; donde $K = 97$

P_{ex} = densidad de la madera seca

d = diámetro del clavo

Resistencia al esfuerzo cortante: $P_{corte} = K \times d^{3/2}$; donde K varía con la especie (121 a 130).

A medida que decrece el ángulo entre clavo y fibras, decrece el poder de retención.

La penetración mínima recomendable es de 2/3 del espesor del soporte o bien tres veces el espesor de la pieza más delgada.

Para evitar que la madera se raje y para asegurar el pleno enlace de cada clavo hay que atenerse a las siguientes prescripciones



14. Cualquier fijación supone la aparición de esfuerzos localizados. Cuando dos fijaciones están demasiado cerca entre sí o alguna de ellas se acerca a un borde o bien a otro tipo de discontinuidad, pueden producirse desperfectos como el de la figura.

respecto a distancias mínimas entre los clavos. La dimensión que sirve como punto de partida es el diámetro del clavo "d".

En la dirección de la fuerza, los clavos han de distar 10 d uno de otro. Transversalmente a la dirección de la fuerza, basta que las distancias sean 5 d. La superficie de enlace de un clavo es, pues, 50 d². La distancia entre un clavo y el borde cargado será de 12 d, i entre el borde no cargado de 5 d.

La dirección de las fibras de la madera no influye en la fuerza que puede soportar un clavo.

Puesta en obra

En algunos tipos de unión será preciso un replanteo previo de la posición de los clavos; para ello se confeccionarán patrones con tablero delgado de madera contrachapada.

Al llevar a cabo el clavado, el operario procurará que no queden varios clavos seguidos sobre una misma fibra o veta de la madera.

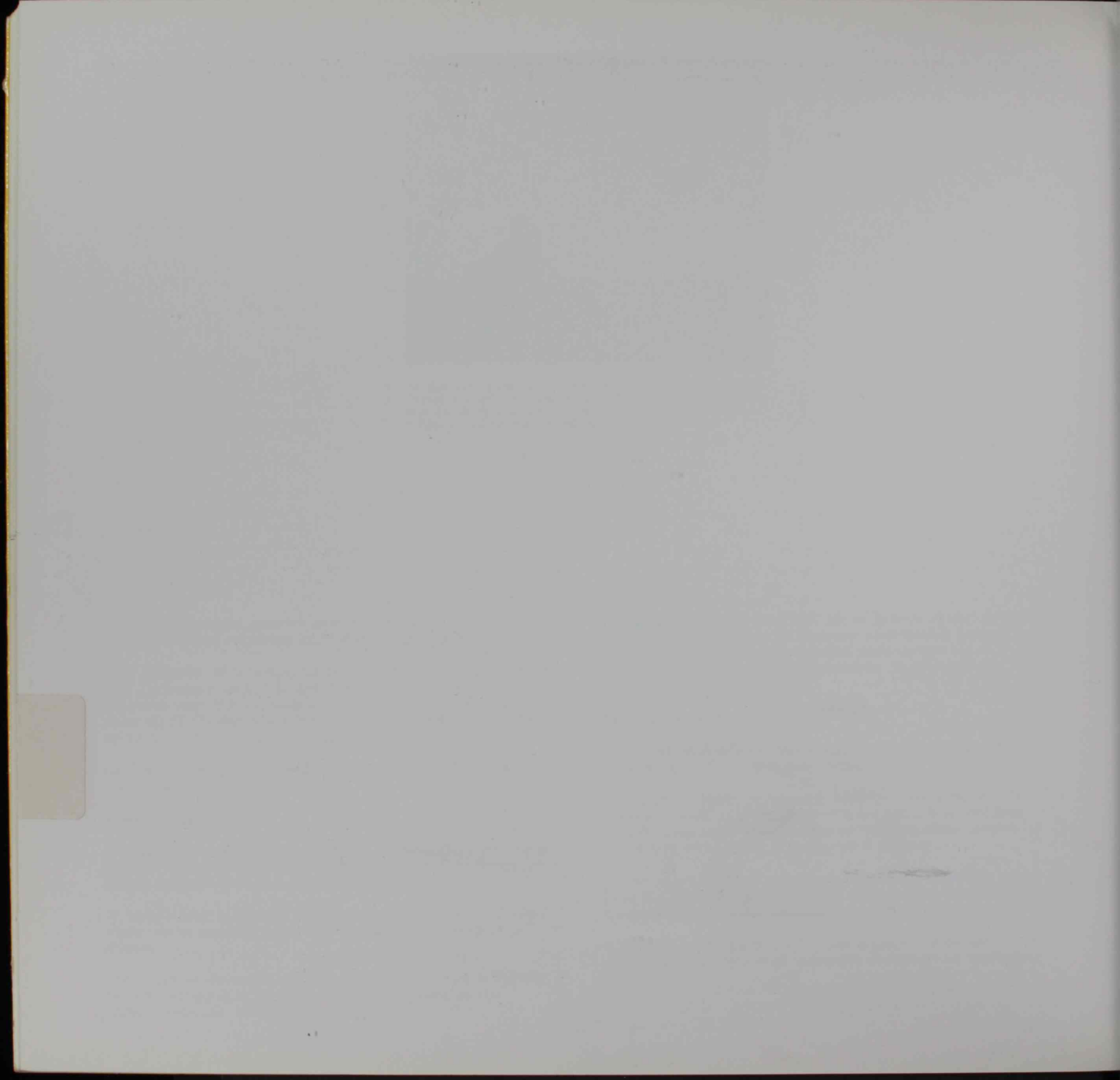
Los clavos se clavarán hasta dejar la cabeza a ras de la madera, pero de manera que, pasando el dedo por encima de sus cabezas estriadas, se noten todavía éstas.

Actualmente se suele renunciar, por lo general, al uso de clavos más largos que, además de atravesar totalmente la madera, permiten doblar y remachar la punta, pues aunque así se aumenta la fuerza de retención del clavo, sin embargo se estropea la fibra de la madera.

Normas generales de puesta en obra

1. Los cubrejuntas deben ser dobles, colocados en las caras opuestas y clavados por ambas caras.
2. Los clavos deben colocarse al tresbolillo para evitar que la madera se abra, si se encontraran todos sobre la misma fibra. También para evitar que se abran las maderas deben emplearse clavos más finos, cuanto más dura es la madera.
3. Con objeto de evitar que se vaya perdiendo la presión de la junta, los clavos no deben clavarse normalmente, sino con una ligera inclinación y siempre distinta unos de otros.
4. Cuando los clavos que atraviesan la unión han de ser remachados, su largo debe sobresalir, como mínimo, tres veces su diámetro.

Tercera Parte



A lo largo de los capítulos anteriores hemos ido estableciendo cuáles eran las exigencias fundamentales a las que era preciso atender en la aplicación de las técnicas de puesta en obra de los diversos tipos de materiales. Una lectura vertical de estas técnicas nos permite establecer unas ciertas relaciones entre aquellas exigencias y parece posible una agrupación de las mismas en función de unos criterios de clasificación muy sencillos. Esta agrupación supone una cierta síntesis general de lo expuesto y abre paso a lo que podría ser una teoría general de las exigencias de la puesta en obra. El cuadro anexo al final de este capítulo resume esta síntesis.

Los criterios de clasificación más significativos son los siguientes:

1. Exigencias que se refieren al funcionamiento del tipo de material que garantiza la unión. En efecto, el correcto funcionamiento del nuevo elemento constructivo exige una solidaridad entre sus partes que es garantizada por algunas características de sus materiales de unión que deben alcanzarse en el proceso de puesta en obra. Merecen un tratamiento especial las exigencias cuyo objetivo es garantizar la siempre difícil resistencia a la tracción del nuevo elemento.
2. Exigencias que se refieren a las condiciones del entorno que garantizarán que el proceso pueda llevarse a cabo. Veremos primero las condiciones que debe satisfacer el entorno. Entre ellas habrá exigencias de tipo térmico, físico, etc. Su incumplimiento puede hacer imposible o deficiente el proceso químico, mecánico, etc. en que se basa la puesta en obra.

También incluimos aquí una exigencia muy puntual para garantizar la calidad final del elemento constructivo, que algunos procesos pueden plantear en función de la propia agresividad de su aplicación.

3. Exigencias que se refieren a la adecuación de la forma final del elemento constructivo. En este capítulo pueden marcarse tres grupos de exigencias:

El primero se refiere a las condiciones del aspecto deseado: condiciones estéticas, de regularidad, de expresión del proceso constructivo.

El segundo reúne las condiciones que garantizan el comportamiento solidario con los elementos vecinos.

El tercero, finalmente, reunirá las condiciones que exigen el perfecto cumplimiento del eventual papel de soporte estructural del elemento que se debe estudiar. Como un ejemplo importante, el cuadro recuerda las exigencias de los elementos estructurales verticales.

Veamos como se ordenarían las exigencias ya establecidas de acuerdo con estos criterios de agrupación.

Exigencias que hacen referencia al funcionamiento del material que garantiza la unión

1. En las técnicas de puesta en obra de los materiales formáceos.

Exigencias que debe satisfacer el proceso de ejecución de las distintas técnicas

		Por la forma del material	Por el tipo de proceso de puesta en obra	
		Para conseguir el comportamiento solidario entre sus partes	Para que este proceso pueda llevarse a cabo	
AMORFOS	Moldeado	Composición adecuada y homogénea Compacidad de la masa	Adecuación entre la velocidad de cambio de la plasticidad y el proceso de puesta en obra	
	Extendido	Cohesión entre las capas sucesivas		
PEQUEÑOS CONFORMADOS	Albañilería	Trabazón entre las piezas Adherencia piezas-aglomerante		
	Chapado			
		Por la medida de la pieza		Para que no se estropeen los elementos a unir
GRANDES CONFORMADOS	Unión de grandes conformados	Evitar esfuerzos locales excesivos Conseguir la perfecta colocación y estabilidad de la pieza	Distribución homogénea de las compresiones	Evitar esfuerzos locales excesivos
	Soldadura		Accesibilidad de los puntos de trabajo	Evitar excesivas elevaciones locales de temperatura
	Fijación			Evitar esfuerzos localizados excesivos durante el proceso o en el comportamiento posterior

Por la forma y función del elemento constructivo final

Para conseguir el acabado deseado	Para garantizar el comportamiento solidario con otros elementos	Para satisfacer el eventual papel estructural del elemento constructivo	
Textura y planeidad	Forma interna igual a la proyectada	Perfecta verticalidad	
	Preparación de la base		
	Formación de adarajas y endejas Marcar juntas para mejorar la adherencia	Homogeneidad de las hiladas	Perfecta verticalidad
		Precisión en la colocación	Perfecta verticalidad
	Calidad de la soldadura Preparación de la base		

En este tipo de materiales, el elemento constructivo se forma directamente por moldeo, y no por unión de varias piezas. La solidaridad en el funcionamiento del elemento final la garantizan las mismas propiedades hidráulicas de la pasta, y las garantías las ofrecerá la calidad y la homogeneidad de su composición en todo el elemento moldeado.

En particular, la capacidad de resistencia a la tracción del hormigón armado está encomendada a las armaduras. Por ello es fundamental la adherencia de la armadura con la pasta. Quizá no se ha insistido suficientemente sobre este punto. Será necesaria, pues, la capacidad de la masa y la garantía de su contacto con las armaduras.

En el tendido, la adherencia entre las capas sucesivas plantea la dificultad fundamental. Debe tenerse en cuenta la exigencia de ejercer presión en cada operación, etc.

2. En las técnicas de puesta en obra de los pequeños elementos.

El funcionamiento solidario del elemento constructivo final está garantizado aquí por la trabazón geométrica que exista entre las piezas y la adherencia que llegue a adquirir la unión entre éstas y el mortero. De ahí la importancia de las leyes de traba, por una parte, y de la presión en la colocación de los ladrillos, por otra.

3. En las técnicas de puesta en obra de los grandes conformados.

El hecho de que las piezas lleguen a la obra como grandes conformados exige a la fábrica de las exigencias de comportamiento solidario interno, pero provoca otras nuevas exigencias debidas al tamaño y al peso de las piezas: la necesidad de evitar esfuerzos locales excesivos, de garantizar la estabilidad durante el montaje y de corregir cualquier imperfección en la perfecta colocación de la pieza.

Exigencias que garantizan que el proceso pueda llevarse a cabo correctamente

Todas las técnicas en que la solidaridad del elemento constructivo final se consigue a través de un proceso de fraguado exigen las mismas condiciones al entorno en que se va a realizar este proceso. En general, estas condiciones tienden a garantizar que la temperatura y la humedad sean las idóneas, pero también exigen que el elemento no esté sometido a esfuerzos mecánicos antes que el fraguado haya dado al material la consistencia necesaria para soportarlos. En particular, estas exigencias son fundamentales en el caso del moldeo de materiales formáceos, sobre todo si se trata de hormigones estructurales, pero también deben tenerse en cuenta en cualquier otro fraguado hidráulico, como el tendido, e incluso la albañilería, aunque en este caso otras exigencias adquieran una mayor importancia. A pesar de ello no debe olvidarse, por ejemplo, la importancia de no golpear las fábricas durante el fraguado de los morteros. Los fraguados no hidráulicos plantean las mismas exigencias, aunque los valores que exigen, en cuanto a temperatura y tiempos de fraguado, sean muy diferentes.

Los grandes conformados, tanto si son corrientes como si son grandes paneles, exigen al mortero el papel de cojín para evitar las compresiones localizadas. Este hecho ha condicionado toda la evolución y todo el proceso de puesta en obra de estos materiales.

Exigencias que dependen de la forma y la función final del elemento constructivo

Dentro de este grupo, hemos distinguido tres tipos de exigencias:

Las que garantizan que el aspecto del elemento constructivo es el deseado.

Las que garantizan la solidaridad del elemento constructivo con sus vecinos.

Las que permiten al elemento cumplir su eventual papel de soporte estructural.

Dentro del primer grupo se encuentran las exigencias de textura y planeidad, que son parecidas en los elementos formáceos y en los pequeños elementos. No trataremos de los conformados porque este objetivo lo asumirá la fábrica.

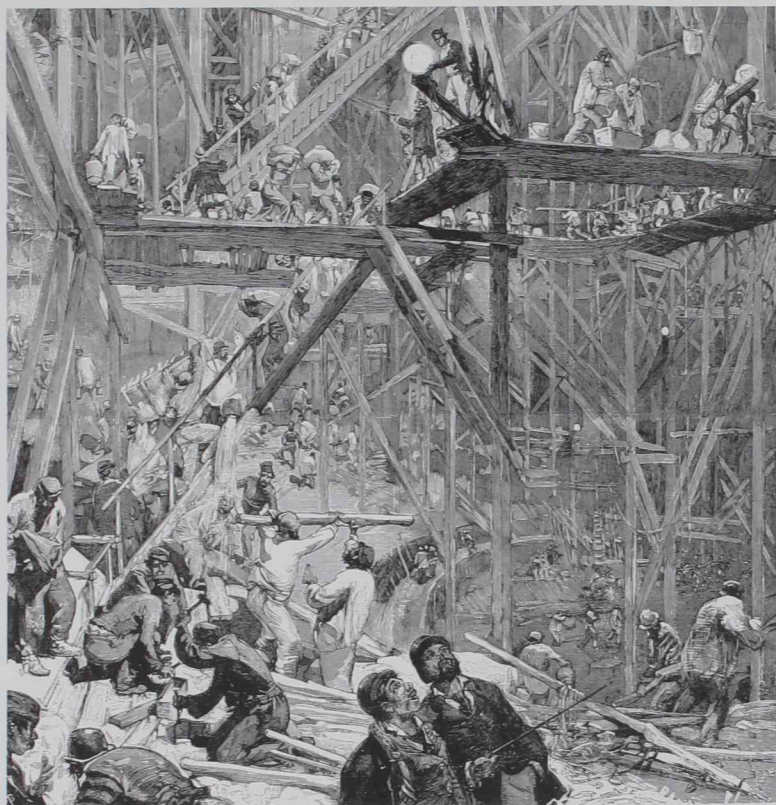
Dentro del segundo grupo, la exigencia más común es la preparación de la base, exigencia especialmente importante en el caso del tendido, pero necesaria, con aspectos específicos en cada caso, en casi todas las técnicas de puesta en obra. El hormigón armado confía la solidaridad a las armaduras, y por ello debe cuidarse especialmente su forma interna. Esta colocación de las armaduras es también la garantía de su comportamiento dentro de la estructura y conduce al tercer grupo de exigencias.

En los grandes conformados, la perfecta colocación de la pieza hará que los esfuerzos se transmitan de unos elementos a otros sin que aparezcan tensiones secundarias graves.

Las uniones de los grandes conformados plantean siempre problemas dimensionales, por ello la técnica de unión ha de ser capaz de absorber las tolerancias de su fabricación. Esta exigencia es especialmente importante si, además, la unión es de dimensiones reducidas, como la soldadura, o incluso puntuales, como la fijación. El diseño y la puesta en obra deben garantizar a la vez la precisión y la adaptabilidad de la fijación.

Cuando se trate de elementos sometidos a esfuerzos de cierta importancia, esa precisión podrá ser vital. Es el caso de las citadas fijaciones, pero sobre todo de la soldadura, donde la coincidencia de elementos como las alas, ejes, etc., es definitiva para asegurar la capacidad mecánica de los elementos estructurales.

Cada tipo de elementos estructurales puede plantear exigencias específicas. Los elementos verticales portantes necesitan mayor precisión en el aplomado cuanto más esbeltos sean. En el caso de la albañilería se plantea además la necesidad de la horizontalidad de las hiladas.



1. La construcción se ha considerado durante muchos años un sector atrasado y, por tanto, necesitado de su propia "revolución industrial". Este magnífico grabado de la construcción del Palacio del Trocadero en 1878 puede servir de referencia para reconocer los cambios que realmente se han producido en las últimas décadas y que se analizan en este capítulo.

El fracaso de la industrialización

Durante muchos años hemos considerado que la construcción era un sector atrasado y que le era necesaria una revolución tecnológica. Se creía que su evolución había sido lenta porque era un sector viejo, como la agricultura, pero que estaba a punto de llegar la deseable "industrialización". Así la edificación se abarataría y se pondría al alcance de todos gracias a una revolución como la que ha sufrido la producción de bienes de consumo. Esa industrialización permitiría controlar realmente una calidad que ya parecía estar asegurada por una artesanía en desaparición. Era, pues, necesario encontrar nuevas formas de expresión arquitectónica porque los terribles "polígonos" prefabricados que toda Europa estaba produciendo eran sólo errores de inmadurez, de esquematismo en la aplicación de las imposiciones tecnológicas más primitivas.

No podemos entrar aquí en el análisis de los errores que las afirmaciones anteriores encierran. Ya lo hemos hecho, y ampliamente, en otro lugar (1).

Los años de la expansión pasaron y los brotes de esa evolución no se han desarrollado. La construcción no puede ser industrializada, por lo menos a la manera de los electrodomésticos o del automóvil, porque, felizmente, su producto está subordinado a las exigencias específicas de cada lugar y de cada comunidad. El entorno, la historia, los materiales locales y las dimensiones de la parcela son otras tantas exigencias (ecológicas) específicas del lugar y totalmente imposibles de obviar.

Sin embargo, este fracaso de una industrialización inmediata no quiere decir que los mecanismos que han revolucionado la producción en la sociedad no estén actuando también en nuestro sector.

Las leyes de la evolución tecnológica

Estos mecanismos han sido resumidos en dos leyes que dirigen la evolución tecnológica:



2. La exigencia de enormes series de edificios idénticos que, de la manera más primitiva planteaban los primeros sistemas de prefabricación, produjo su autoextinción en los primeros amagos de la crisis económica. Ciutat Badia fue una de las últimas grandes operaciones.



3. Estos montadores de un rascacielos americano ejemplifican unas transformaciones en el personal en obra que está en el límite de la evolución tecnológica y la división del trabajo.

- a) la división del trabajo,
- b) el incremento de la proporción correspondiente a las inversiones (máquinas) en detrimento de la que corresponde al trabajo, en el valor del producto (2).

La primera, la división del trabajo, había sido elogiada por Adam Smith setenta años antes que F.W. Taylor escribiera su popular "Scientific Management", texto en que describe la manera de encontrar ese "único mejor camino" para incrementar la producción.

La esencia de la división del trabajo tayloriana se basa en:

- la definición detallada de los gestos simples que forman el proceso productivo,
- su parcelización de acuerdo con un proceso secuencial,
- la simplificación de esos actos para que requieran la menor cualificación posible en su ejecución, y
- la repetición máxima de los mismos para reducir los tiempos de adaptación y acelerar el automatismo de la ejecución.

La segunda ley citada era la del incremento de la importancia relativa del capital fijo en el valor del producto final. Según Coriat, este incremento es la garantía del aumento de los beneficios, si la jornada laboral permanece inalterada. "El capital tiene una tendencia, inherente a su funcionamiento, de producir e incorporar máquinas que incrementan cada vez más la productividad del trabajo vivo. Este aumento de la productividad permite que el capitalismo - al disminuir el tiempo de trabajo socialmente necesario para producir una mercancía- incremente el tiempo de sobretrabajo". Las economías de escala exigidas por todos los procesos productivos contemporáneos no son más que una consecuencia de lo expuesto. Las progresivas inversiones en maquinaria necesitan un incremento paralelo de la escala de intervención. Las limitaciones de la demanda imponen el acortamiento de la vida de los bienes de consumo.

Tendremos que reconocer que, en el campo de la construcción, no se profundiza en el análisis hasta llegar a las fuentes taylorianas de los procesos de industrialización. Para el técnico de la construcción, las técnicas de los grandes paneles o los encofrados-túnel parecen fruto de una evolución específica y autónoma a la que se califica de industrializada en un sentido laudatorio por su supuesta mayor productividad y su evidente espectacularidad, pero sin que eso presuponga aceptar que la división del trabajo y el incremento progresivo de la composición orgánica del capital marquen las leyes de desarrollo de las técnicas de edificación. Sin embargo, alguien muy poco sospechoso de izquierdismos y experto por antonomasia en la industrialización de la construcción, Gérard Blachère, es perfectamente consciente de cuál es la raíz del proceso. Su definición, extrapolada de la práctica de la construcción, está sorprendentemente acorde con los textos "políticos" que hemos utilizado hasta ahora: "La esencia de la industrialización es producir un objeto sin mano de obra artesanal, con máquinas servidas por obreros simplemente especializados, no cualificados y, mejor aún, por máquinas automáticas" (3). En otras palabras: conseguir la expropiación del saber obrero para hacer posible el incremento de la mecanización e incluso la automatización a través de la división del trabajo.

Vemos como las leyes básicas expuestas condicionan la construcción cotidiana.

La división del trabajo

Hemos visto como el primer paso de la división del trabajo es la expropiación del saber obrero, que permitirá el posterior despiece y análisis de operaciones elementales. Excusándose en la falsa razón de que no es posible formar maestros albañiles a la velocidad que el sector requeriría (razonamiento difícil en un momento de crecimiento prácticamente nulo), la construcción se ha transformado con la finalidad de reducir el campo de trabajo y marginar la actividad de los artesanos.

El campo de trabajo se ha reducido por la casi desaparición de los muros portantes de ladrillo, las bóvedas de escalera, los forjados de bóveda de ladrillo sobre vigueta, los trabajos de mampostería, etc. y la aparición de las fachadas ligeras, los pequeños elementos prefabricados, el bloque de hormigón machihembrado, los revestimientos y tabiques de placas de yeso, los pavimentos especiales y los mil colocadores de alicatados, terrazos, etc., "especialistas" que están reduciendo el trabajo del albañil a "tirar" tochanas o, en el mejor de los casos, a realizar fachadas decorativas de obra vista. Hay partes de la obra que, por su carácter relativamente homogéneo entre un edificio y otro, han permitido un avance notable de la división del trabajo; las estructuras de forjados sin vigas de hormigón armado, sean reticulares o de jácena plana, se han racionalizado sorprendentemente y han permitido la aparición de los trabajos de replanteo, (encofrado, ferralla, colocación de casetones y vertido) cada uno de los cuales es realizado por un "especialista" más o menos cualificado.

El incremento de la inversión fija

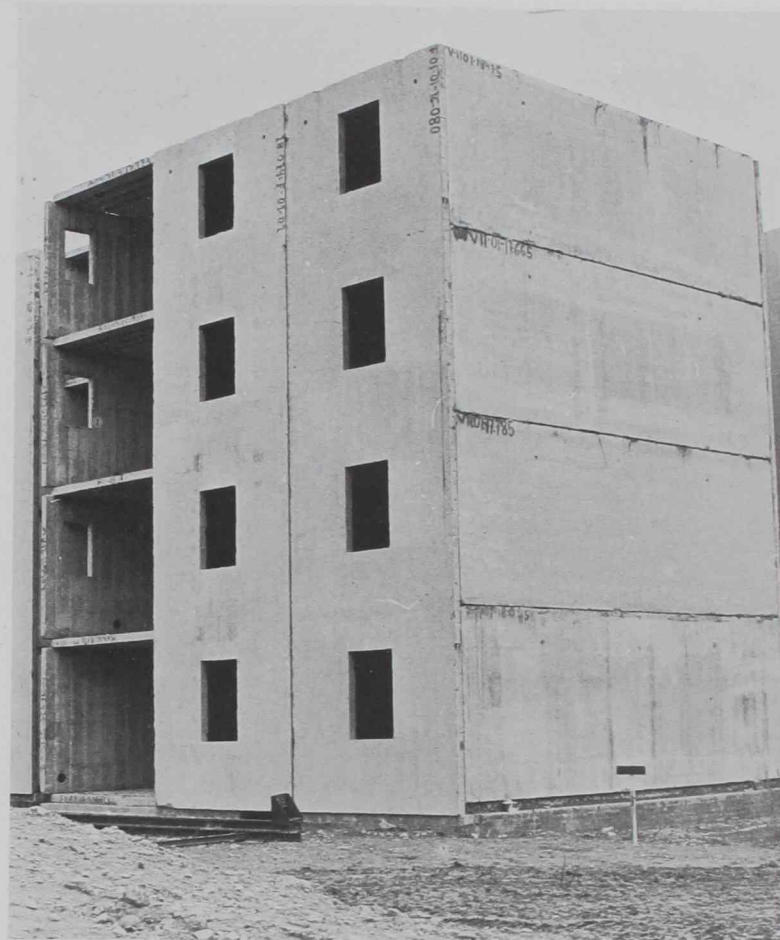
Cualquier empresa prefiere comprar herramientas antes que contratar personal. A pesar de las dificultades de mecanización del sector, esta línea avanza, ya sea introduciendo encofrados más sofisticados ya adquiriendo grúas cada vez más potentes u otros sistemas mecanizados para el movimiento de materiales (dumpers, paternoster, plataformas proyectables para la descarga de palets, pequeñas grúas móviles todo-terreno, bombas para elevar mortero, etc.).

Aunque menos espectacular, es muy significativa la progresiva invasión de máquinas-herramienta: perforadoras, martillos, pistolas, etc. y sus complejas combinaciones. En pocos años, la pequeña y mediana empresa ha adquirido un índice de mecanización similar al de las empresas monstruo del sector.

Otro aspecto es la progresiva entrada en la obra de las empresas de alquiler de servicio de grandes máquinas. Los tres ramos más importantes son el de movimiento de tierras, las cimentaciones especiales y las grúas hidráulicas. El avance de la mecanización en estos campos es impresionante.

La construcción, hoy

Sería difícil defender que la obra de hoy tiene unas características técnicas similares a las de la industria, pero



4. Los problemas que provoca la heterogeneidad de los materiales se agravan por el progresivo incremento del tamaño de las piezas que se colocan en obra. En efecto, el uso de piezas preconformadas permite que se desarrollen en fábrica, de manera más sistemática, muchas operaciones que tradicionalmente pertenecían al tajo. Un ejemplo monstruoso de este incremento del tamaño es esta pieza de fachada de cuatro plantas de altura. El objetivo de este gigantismo es simplemente explotar las posibilidades de la extravagante máquina Koslow, rocambolescamente importada de Rusia a Mejorana del Campo.



5. El sueño de la evolución tecnológica es la absoluta prefabricación, la eliminación de las operaciones en obra y la liberación de las operaciones de transporte y elevación que ofrece esta "mobile home" y su "grúa del cielo". Hace ya 40 años que Fullen soñara este sistema en el Dimaxion House.



7. El cubilote, herramienta habitual de transporte y vertido del hormigón.



6. Transporte a hombros de los materiales de hormigón en una obra de El Cairo.



8. La bomba de hormigonado permite el transporte y la puesta en obra en continuo del hormigón.

tampoco pueden cerrarse los ojos a las profundas transformaciones que acabamos de citar. En la serie cronológica artesanado, manufactura e industria, nadie se atrevería a situar la construcción en el artesanado, pero debe recordarse que la manufactura es una forma especial de colaboración "cuyo fundamento sigue siendo la habilidad en el oficio". "La ejecución no deja de depender de la fuerza, de la habilidad, de la prontitud y de la seguridad en el manejo de sus útiles".

En la mayor parte de los casos, sin embargo, la desaparición del artesanado se ha dado sin que el abanico de técnicas disponibles pueda ofrecer una alternativa válida. Todos los profesionales hemos sufrido las consecuencias de la supervivencia de los yeseros destajistas y la picaresca de la "buena vista", los alicatadores improvisados y los colocadores de tochanas que sustituyen al maestro albañil. En la obra sólo encontramos peones viejos, pues los jóvenes se han apresurado a autocalificarse de oficiales con una superficial especialización. Así, con algunos peones, muchos falsos maestros y bastantes especialistas destajistas, se levantan las obras de hoy basadas en la falta de oficio y en los destajos.

Se trata, por tanto, de una situación de transformación difícil de calificar, pero que, aunque estancada por la crisis de estos años, parece tender hacia una mayor especialización de la mano de obra, apoyada por un uso intensivo de herramientas y máquinas. Esta evolución, inestable en este contexto económico, puede tomar diferentes caminos en función de los criterios que vamos a exponer.

Vectores de la evolución tecnológica

Es evidente que el juego de las leyes citadas, en el contexto de la sociedad capitalista, impulsa a la evolución tecnológica a trasladar a la fábrica el mayor número posible de operaciones. En efecto, en la fábrica, la división y la mecanización del trabajo podrán llegar con facilidad a niveles difícilmente alcanzables en la obra. Aparece, así, un vector de la evolución tecnológica que apunta hacia los componentes y, si es posible, hacia los grandes componentes tridimensionales. El "desideratum" de esta evolución es la "mobile home" americana, la vivienda móvil que sale de la fábrica totalmente acabada.

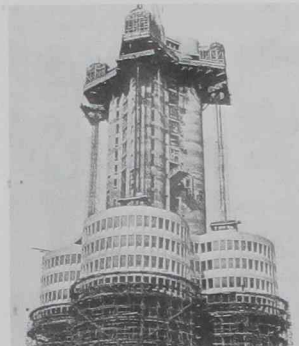
Afortunadamente, esas leyes de producción se subordinan todavía, en la mayor parte de los países occidentales, a una



9. Los encofrados convencionales son de tabla con una estructura de soporte adecuada a su tamaño y situación.

exigencia fundamental del sector: la subordinación espacial de la producción al mercado. La empresa constructora todavía tiene que ir a construir donde hay demanda de edificación, y debe someterse a las condiciones del lugar: climáticas, técnicas, físicas, culturales, etc., y a las exigencias del grupo contratante. El mercado se presenta, pues, como una distribución de la producción en lugar de la distribución de bienes que caracteriza a todos los demás sectores. Esa subordinación y la fragmentación de la producción que exige, ha permitido la supervivencia de algunas técnicas especializadas y ha abierto paso a la esperanza de que será posible someter la construcción al cambio que exige el marco sociopolítico de nuestros tiempos, pero sin imitar, mimética y esquemáticamente, la industrialización banalizadora y repetitiva de la producción de bienes de consumo.

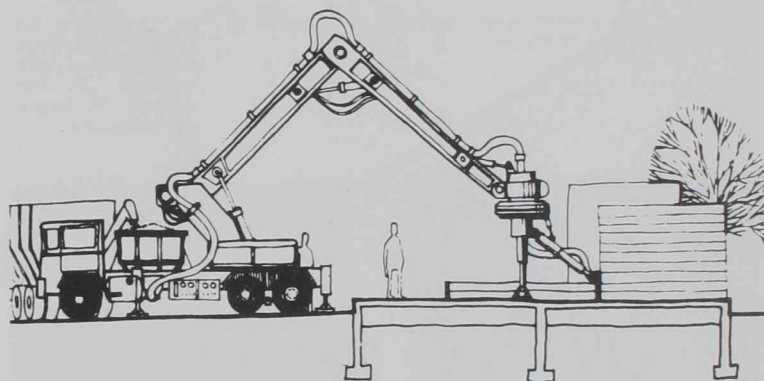
Esta tendencia marca un vector que apunta en sentido contrario del anterior, y que, por el respeto al lugar y al entorno que propugna, llamaremos vector ecológico. En efecto, los materiales no conformados y los pequeños elementos se adecuarán mucho mejor a las condiciones específicas de cada lugar y de cada cliente que los voluminosos y condicionantes componentes con sus técnicas sofisticadas.



10. El encofrado deslizante supone la introducción en esta operación de la idea de continuidad.



11. La extrusión continua de poliuretano se usó en las viviendas de emergencia tras los terremotos turcos. Los ocupantes no pudieron evitar la adecuación de este extraño "igloo" a su cultura con los elementos y los materiales locales.



12. Esta máquina imaginada por E. Allen (y ensayada a pequeña escala) permitía extrusionar tongadas de mortero aireado para formar un edificio.

La situación de las técnicas de construcción en cada país se inclinará hacia uno u otro extremo de nuestro cuadro en función del equilibrio de fuerzas entre el respeto a lo pequeño, a lo tradicional, etc. y la exigencia de una productividad creciente. No es casual que hoy en Gran Bretaña, más del 80% de las viviendas se construyan con métodos tradicionales basados en el ladrillo y la madera, mientras la "mobile home" triunfa en los EUA, y el 90% de las viviendas de Moscú son producidas por cinco fábricas de grandes paneles.

Las tendencias de evolución

Si durante los años sesenta el desarrollismo favoreció la aparición de técnicas situadas en el extremo del vector tecnocrático, hoy la crisis y la consiguiente mayor consideración prestada a los aspectos sociológicos y a los valores patrimoniales están matizando esa tendencia que siempre está en el meollo de nuestro sistema económico.

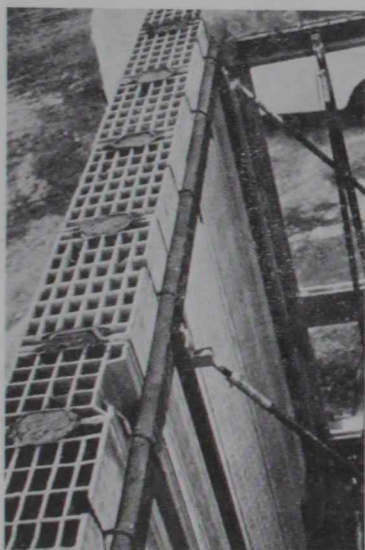
A los efectos que nos interesan, las consecuencias de esa situación pueden agruparse en los mecanismos de evolución siguientes:



13. El dibujo de Leonardo recoge la cadena de transporte de materiales en la obra tradicional.



14. La escalera con elevador mecánico es una forma de la racionalización del movimiento de pequeños materiales.



15. El ladrillo con altura de un piso, de origen francés, es el límite del incremento de escala de los pequeños elementos, ideado para reducir las operaciones en obra.



1º La mecanización, es decir, la sustitución del artesano por la máquina, sigue dándose, pero la brutal traslación a la fábrica de casi todas las operaciones constructivas, la prefabricación, se ha sustituido por la introducción masiva de la máquina-herramienta. La habilidad que exigían las técnicas tradicionales de adición se sustituye por las piezas y los útiles específicos que acompañan a las nuevas fijaciones.

2º El incremento desmedido del tamaño de las piezas, que era otra consecuencia del traslado a taller de todas las operaciones posibles, está limitado en este momento por la reducción del tamaño de las operaciones y la necesidad de adecuarse a las dimensiones de los elementos preexistentes. Pero esta tendencia, que es intrínseca a la evolución técnica, reaparece en cuanto la obra lo permite y provoca graves problemas de comportamiento diferencial por las deformaciones que esas grandes piezas acumulan y por la rigidez del comportamiento global de un edificio formado por tan grandes componentes.

3º Una consecuencia indirecta, pero fundamental de esta evolución, es la introducción de materiales cada vez más específicos y cada vez más especializados para la perfecta satisfacción de una sola exigencia. Esta especialización lleva a la sustitución de los gruesos muros de materiales tradicionales por una suma de finas capas de materiales especialistas. Los problemas de comportamiento diferencial, que ya señalábamos en el punto anterior, se agravan así enormemente y obligan a resolver sus uniones con técnicas específicas que permitan el libre comportamiento de cada elemento constructivo y, más aún, de cada capa. Esta evolución propicia nuevamente el éxito de las fijaciones como sistema de unión, de las máquinas-herramienta, y de las piezas muy elaboradas como elementos clave de la utilización de éstas. En el próximo volumen de esta obra veremos las consecuencias de esta evolución en los sistemas constructivos. Acabaremos aquí estas notas haciendo un breve recorrido por las consecuencias que estos aspectos evolutivos tienen sobre cada uno de los grupos de materiales.

Los materiales amorfos

Transporte

El grado de plasticidad de estos materiales caracteriza las técnicas de su transporte en obra que, juntamente con la velocidad de fraguado, define las exigencias que tiene que satisfacer el molde.

En efecto, el transporte de un material amorfo siempre exigirá la utilización de un contenedor, aunque si la consistencia es suficiente, éste puede llegar a ser tan simple como las manos de un niño. Tradicionalmente, el transporte se ha realizado en espuelas, capazos, etc., como en la obra de hormigón armado de un país subdesarrollado que muestra la figura 6. El volumen del contenedor está limitado por el tipo de energía disponible. Por esto coexisten estos sistemas con los gigantescos cubilotes que son movidos por las actuales grúas (fig. 7).

Por otro lado, esta constante de la evolución tecnológica que impulsa el paso desde trabajos discontinuos hasta procesos

continuos para evitar los siempre laboriosos principios y finales de operación ha incidido también en el transporte de materiales. Desde el sistema de cangilones hasta las conducciones de hormigón por gravedad utilizadas en la presa de Talam a principios de siglo, se evidencia un esfuerzo continuado por racionalizar este aspecto fundamental de la obra. La aplicación en el tajo de las formas de energía de que disponemos hoy en día, ha hecho posible la introducción de las bombas, como la de hormigón que muestra la figura 8, capaz de elevar el material a 50 m de altura y transportarlo hasta 250 m de longitud. La plasticidad será siempre el factor decisivo. De su control dependerá que pueda mantenerse dentro del margen de uso que se abre entre los peligros de obstrucción por un lado, y de disgregación, por otro.

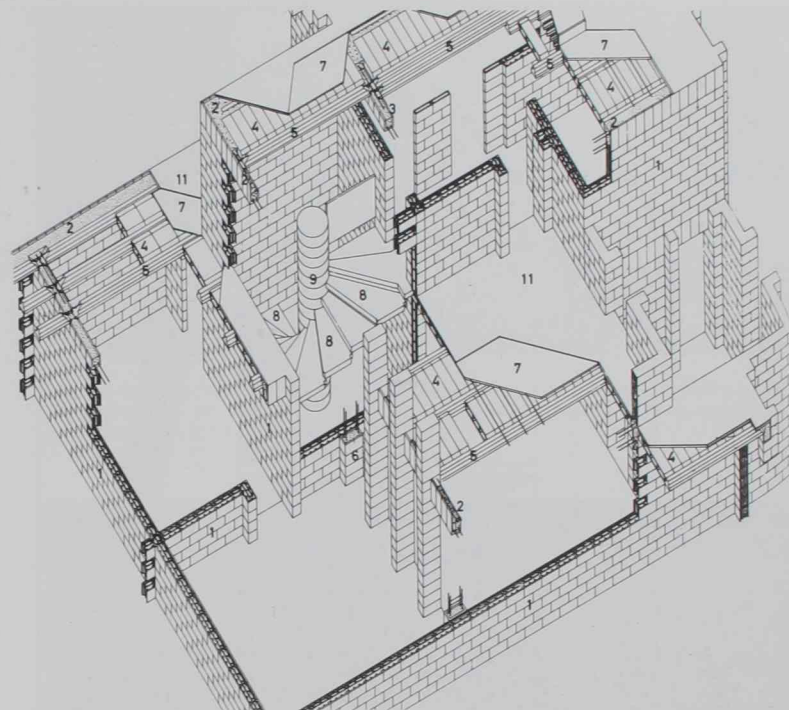
Puesta en obra

Otro factor definitorio de la puesta en obra de los materiales amorfos es el encofrado (fig. 9); la complejidad de su elaboración y manipulación ha conducido a la modulación. Con el fin de reducir el trabajo, se han aumentado las dimensiones hasta llegar a los gigantes encofrados túneles de nuestros días.

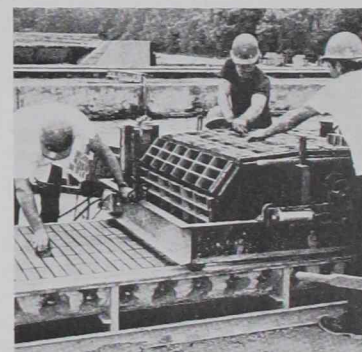
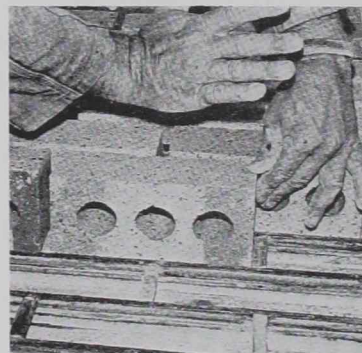
La misma tendencia que empujó hacia los procesos discontinuos y que revolucionó el movimiento de materiales nos ha llevado a la puesta a punto de sistemas de hormigonado en continuo, como es el caso de los encofrados deslizables (fig. 10) para huecos de escalera y huecos de ascensores. Los encofrados deslizables son auténticas bocas de extrusión que se apoyan en el mismo hormigón que han conformado, y evitan los imprevistos y las complicaciones de cada inicio de trabajo, de cada operación de encofrado y desencofrado. El trabajo continuo permite un avance que puede llegar a unos 5 m lineales diarios, con una elevada productividad.

Otra línea dentro de la búsqueda de simplificación en la manipulación del molde conduce a los encofrados perdidos, las chapas plegadas para los forjados, el metal desplegado para usos múltiples, láminas de cartón-yeso, etc. Combinando la tendencia hacia procesos continuos con la progresiva simplificación del encofrado llegamos a la introducción del gunitado o proyectado de plásticos, yesos, morteros e incluso hormigón.

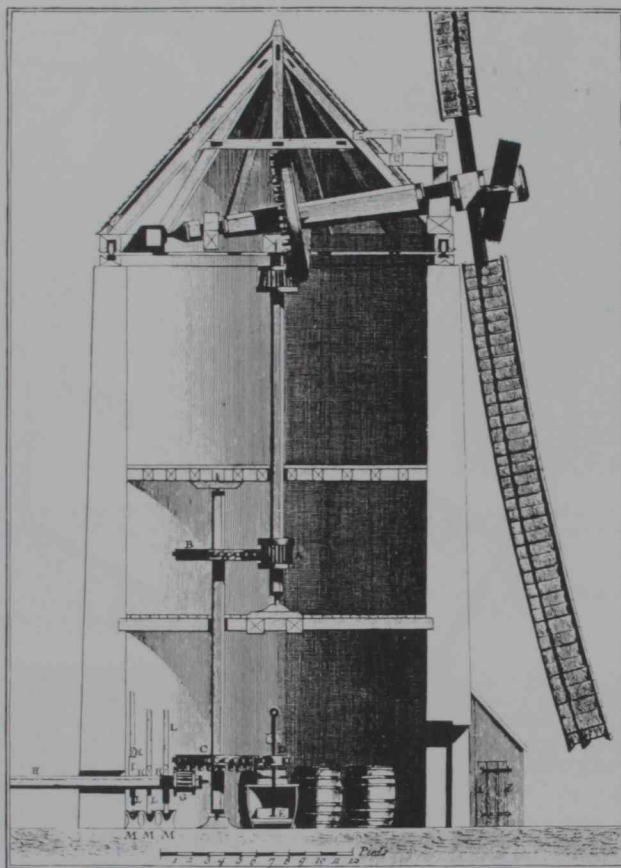
Finalmente, y casi rozando la ciencia ficción, la mecanización de la puesta en obra de materiales amorfos ha llegado a su expresión más sofisticada con la extrusión de plásticos en obra. Pueden citarse, pues, tres casos prácticos: los "igloos" de poliuretano de la Bayer (fig. 11), las cúpulas de la Dow Chemical y las experiencias personales de Edward Allen. Los primeros son los más conocidos por haber sido utilizados en las viviendas de emergencia en Nicaragua y Turquía. Allen, en su búsqueda de la máquina mágica de construir, ha conseguido extrusionar unos muros con mortero aireado de perlita. El extraño brazo articulado extrusionador se detiene cuando llega al hueco de la ventana y gira en las esquinas de la casa (fig. 12).



16. El sistema Tabibloc es un ejemplo de cómo la simplificación de la puesta en obra, por geometrización de la pieza, supone cierta limitación formal del resultado.



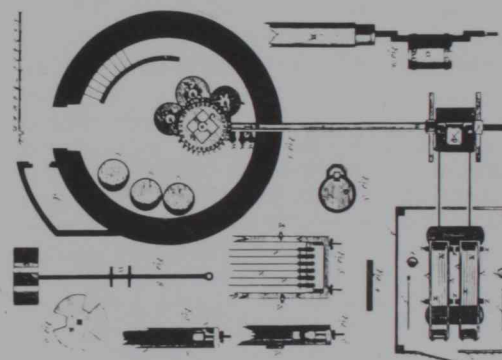
17. La mecanización de la puesta en obra es un sueño de los racionalizadores de la construcción que casi se hace realidad en los sistemas inglés y americano de fabricación de grandes paneles.



18. La lámina de la "Enciclopedia" evidencia la importancia histórica del corte en la preparación de los materiales naturales.



19. Las sierras de disco están revolucionando hoy el corte en obra.



Los pequeños elementos

Transporte

El movimiento de los pequeños elementos dentro de la obra se ha hecho siempre por transporte manual (fig. 13).

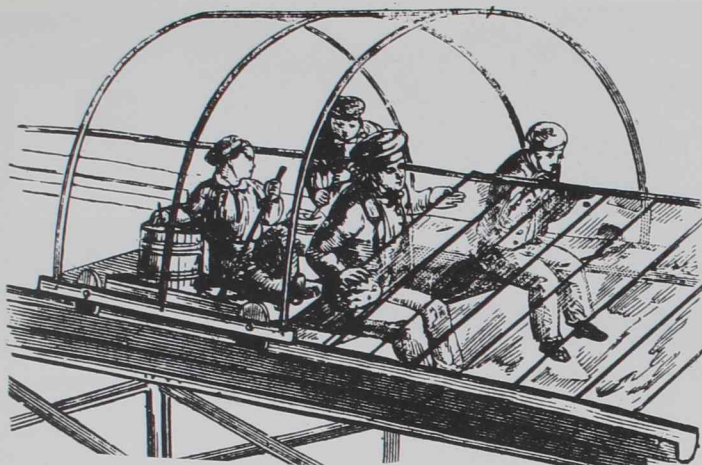
Hoy se tiende a una rigurosa utilización de palets con objeto de aumentar la medida de la unidad transportada y optimizar el uso de los grandes medios de elevación, o a su reducción para obtener ingeniosos instrumentos adecuados a las obras de pequeña envergadura, como es el caso de la escalera-elevadora de la figura 14.

Puesta en obra

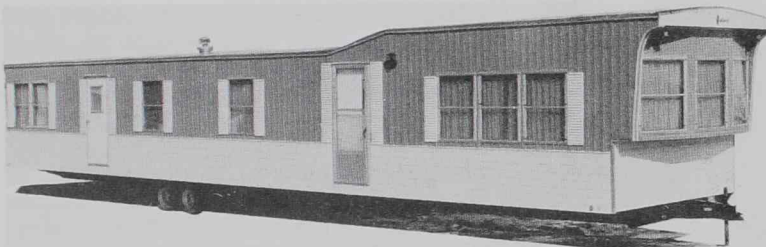
Es posible que el mayor esfuerzo para reducir la cantidad y calidad de la mano de obra utilizada en la colocación de los pequeños elementos, se haya hecho por el camino del aumento de sus dimensiones. El ladrillo se ha visto sustituido en la

formación de tabiques por una pieza hueca y machihembrada de hasta 70 cm. En competencia con ellas, han aparecido las placas de yeso de dimensiones parecidas, que últimamente se alargan hasta llegar a la altura del piso, con un ancho de 90 cm.

La teja cerámica soporta la competencia de la de hormigón porque en este último material las piezas se unen para dar elementos de más de un metro. Hace ya tiempo que el entrevigado de los forjados se hace con bovedillas de rasilla. Posiblemente, el caso más espectacular es el de la pieza cerámica francesa de 260 x 60 x 30 cm (fig. 15). Estos ejemplos son curiosos, pero tienen limitaciones graves. Una de ellas es la puesta en obra (A. Camuñas define el ladrillo como prisma de tierra cocida que puede asentar el albañil con una sola mano); la otra es la fisuración. El aumento de las dimensiones de las piezas reduce la deformabilidad de los elementos constructivos y aumenta los riesgos de fisuración. Este es el motivo del éxito limitado del bloque de hormigón y de la placa de yeso para la tabiquería.



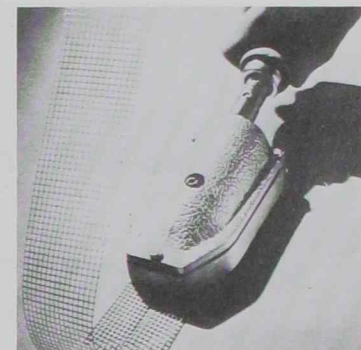
20. La colocación de los vidrios del Cristal Palace, según el plan de Paxton, muestra la fácil especialización de la puesta en obra de los semiproductos.



23. Las primeras versiones de la "mobile Home" estaban muy cerca del vagón o remolque...

Otra tendencia apunta hacia la racionalización de la puesta en obra. Desde "Bricklaying System" de Gilbreth, admirado por Taylor y popularizado por su amplio comentario en los "Principles of Scientific Management", se han hecho audaces esfuerzos para sistematizar el trabajo del albañil. Una línea ha evolucionado hacia la sofisticación del equipo, ya sean los andamios, niveles y plomos, o bien los instrumentos para el movimiento de materiales, que han llegado hasta la bomba de mortero que coloca la mezcla al alcance del trabajador. Otra línea ha modificado las formas de las piezas para posibilitar un sistema de colocación forzosa que pueda aumentar la velocidad del trabajo. Aparecen así bloques de hormigón con espigas, topes y reservas, que evolucionan hasta sistemas tan sofisticados como el doblado del machiembrado del Tabibloc (fig. 16) (4).

En el límite de estas tendencias está la mecanización, que se ensaya también desde principios de siglo. En los Estados Unidos se han aprobado sistemas de pegado superficial de piezas que han sido aplicadas con junta seca y sobre las



21 y 22. La grapadora neumática de tablillas de cubierta o la plancha que derrite y pega esa malla, para unir tableros, son ejemplos de la sofisticación de la herramienta en la puesta en obra de los semiproductos.



24. ...pero su amplio mercado cambió rápidamente su imagen por la de la vivienda convencional e incluyó sofisticados elementos como este porche desplegable.

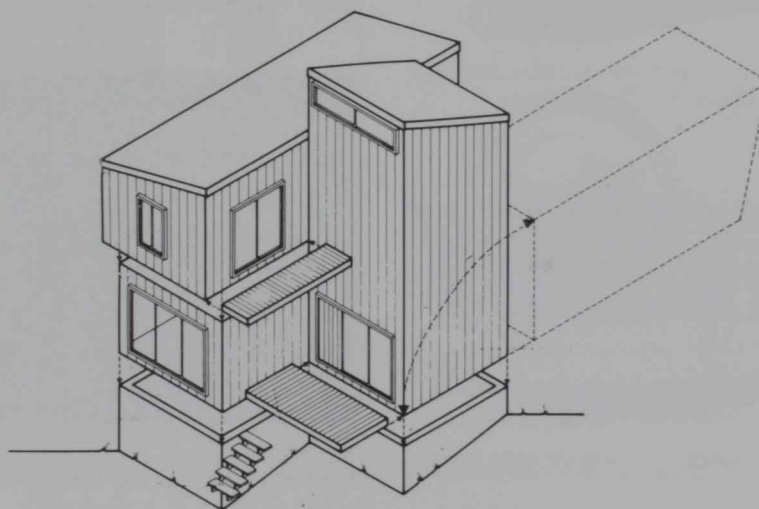
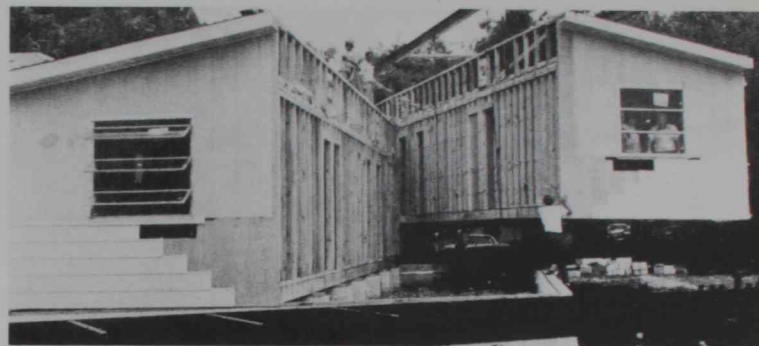
cuales se aplican, por pintado o por proyección, unas resinas epoxídicas, armadas o no. Con objeto de simplificar el trabajo, en algunos casos se forma la pared a pie de obra sobre un tablero horizontal que lleva grabada la posición de las piezas. Una vez colocadas sobre el molde, se vierte mortero e incluso poliuretano (fig. 17).

Los materiales naturales y los semiproductos

La operación específica que exigen estos materiales es el corte. La dificultad de corte de algunos materiales naturales exigió, hace siglos, su traslado de la obra al taller. El molino de la figura 18, descrito en la Enciclopedia de Diderot y D'Alembert, es un curioso ejemplo de la elaboración de estos sistemas de corte. Cerca del Canal Imperial de Zaragoza existe aún un molino hidráulico que funciona de manera similar. Hoy, el corte dispone de toda clase de herramientas, desde las más sencillas hasta el poderoso disco de la figura 19, capaz de cortar enormes gruesos de hormigón armado.



25. Las exigencias de superficie e imagen exigen anchuras que los gálipos de transporte no permitían y fue necesaria la yuxtaposición de dos módulos para formar una vivienda ya absolutamente convencional.



26. Este proyecto de Paul Rudolf explotaba al máximo las posibilidades del módulo transportable, apilándolo e incluso izándolo hasta colocarlo en posición vertical.

La puesta en obra

La puesta en obra de los semiproductos se basa cada vez más en las técnicas de fijación. Se trata de técnicas que no tienen en absoluto en cuenta el conocimiento artesano, sino que han sido totalmente diseñadas por técnicos cualificados con objeto de simplificar y racionalizar el proceso de puesta en obra. Un ejemplo de la rápida aplicación de estos sistemas "de ingenieros" es el que Paxton, jardinero, inventó para colocar los cristales del Cristal Palace (fig. 20): una plataforma rueda sobre las vigas de soporte, transporta a dos colocadores de vidrio y a los dos niños que les sirven el betón para rejuntar. Todo el trabajo se podía realizar rápidamente, con seguridad e incluso a cubierto.

Hoy se ha acelerado la evolución. Cada vez más, la puesta en obra se basa en el uso de herramientas sofisticadas, fáciles de utilizar. La mano de obra que las utiliza aumenta en

rentabilidad y no exige un período de formación excesivamente largo. El artesano ha sido sustituido por el "especialista". Las figuras 21 y 22 muestran algunos ejemplos de herramientas: la grapadora neumática para las pequeñas tejas de madera de la cubierta y la plancha para soldar tableros con malla de plástico.

Los componentes

La reducción al límite de los trabajos en obra conduce al uso de elementos cada vez más grandes, y en consecuencia, los medios de elevación han de ser cada vez más importantes. La fuerza física del operario no es utilizada prácticamente en ningún caso. La colocación es precisa y delicada. Cada caso ha sido estudiado para conseguir la máxima eficacia. Nunca hay lugar para la improvisación en las obras de componentes prefabricados. La rapidez y la limpieza de la obra llevan progresivamente a la mecanización de las operaciones y evitan

toda presencia de agua en la obra. La imagen es la de unos procesos de montaje en los que se tiende a sustituir la unión por la fijación, a fin de acercarse más al taller mecánico. La pieza prefabricada se hace cada vez más grande para poder hacer en fábrica la mayor cantidad posible de operaciones. Por este camino, los americanos han llegado a la definición de un producto nuevo, la quintaesencia del componente: la pieza-vivienda, que llaman "mobile home". Desde principios de los 70 se producen en los EUA más de 700.000 viviendas de este tipo al año, es decir, el doble del número total de viviendas que se han construido en España en los mejores años. En 1977 había más de 300 fabricantes con 700 instalaciones repartidas por todo el país (5).

La "mobile home" es un prisma de carpintería que tiene sus medidas definidas según el gálibo del transporte por carretera. Evidentemente, la "mobile home" ha evolucionado, para abrir mercados, desde los remolques iniciales (fig. 23) hasta las casitas actuales (fig. 24).

El proceso está pensado para imitar al del automóvil y hacer posible, con toda su fuerza, el planteamiento de las exigencias de la tecnología industrializada. El usuario compra su "vivienda" como un electrodoméstico habitable y, evidentemente, puede solicitar determinados embellecedores. El problema del tamaño ha puesto a prueba la imaginación de los diseñadores, pero los resultados son sorprendentes: "viviendas" que se transportan en dos mitades (fig. 25), o en las que el prisma definido por la normativa de transporte puede colocarse en posición vertical (fig. 26). Todos los juegos son posibles.

Este es hoy el límite y el paradigma del componente: todas las operaciones han sido trasladadas a la fábrica. Las experiencias de la productividad se han impuesto más allá de lo razonable.

Conclusiones

La conclusión de este último capítulo es, evidentemente, que la variedad de procesos y materiales que se reúnen en la construcción de hoy y que suponen una riqueza acumulada a lo largo de siglos, no puede ser abandonada sacrificándola a utopías tecnocráticas.

Que la aplicación estricta de los criterios económicos a los procesos técnicos constructivos produce graves deformaciones

en el producto (6). No se trata de adoptar, sin más, posturas estrictamente conservadoras, sino de valorar globalmente los aspectos siguientes:

- La amplia gama de soluciones y tipos edificatorios que es necesario considerar abren un campo de aplicación a todas las técnicas edificatorias. Ninguna, en principio, debe ser olvidada o relegada y todas deben encontrar su aplicación en la construcción actual.

- Algunas de las aplicaciones brutales de los criterios tecnocráticos han producido una inversión grave de valores. Cuando el proceso se hace más importante que el producto, toda clase de valores funcionales y culturales se sacrifican a la optimización. Y esta optimización sólo suele tener en cuenta los aspectos cuantificables del proceso y del producto, olvidando todos los que, por su incomunicabilidad, son más difíciles de introducir en el mecanismo optimizador, sea cual sea su importancia. Este desplazamiento de los mecanismos de determinación, cuya prioridad pasa del producto al proceso, ha sido calificado recientemente de "proceso de inversión de la racionalidad técnica" (7).

Frente a esta evolución nos cabe la defensa de la variedad de recursos técnicos que nos ofrece una construcción fruto de la experiencia de siglos. Es evidente que estas técnicas han de pasar por las transformaciones que imponen las exigencias económicas de nuestra sociedad, pero es preciso que esta transformación sea respetuosa con otras exigencias y mantenga la amplitud actual de posibilidades sin inclinarse exclusivamente por las soluciones espectacularmente industrializadas. La evolución de los últimos años ha demostrado que no son precisamente las soluciones maximalistas (porque se sigue su propia racionalidad técnica) las que mejor se adaptan a la variedad de situaciones del sector.

La evolución que deseamos debe ser enriquecedora y realista a corto plazo. Para llamarla de alguna manera, ya que el término industrialización está lleno de implicaciones tecnocráticas, deberíamos inventar una palabra audaz como, por ejemplo, "constructivizar", para expresar muy claramente que lo que se necesita es profundizar en los propios recursos que la construcción ofrece para su evolución dentro de nuestra cambiante sociedad.

Notas

Introducción

- 1 F. CHOAY, *La règle et le modèle*, París: Seuil, 1980, p. 226.
- 2 L. QUARONI, *Proyectar un edificio*, Madrid: Xarait, 1980, p. 24.
- 3 L. QUARONI, op. cit. p. 19.
- 4 F. CHOAY, op. cit. p. 225 y ss.

La esencia de la construcción

- 1 L.B. ALBERTI, *De re aedificatoria*, traducido del latín por F. Lozano, s. l.: Impr. Alonso Gómez, 1582. Reimpr. facsim. Oviedo: Colegio Oficial de Aparejadores, 1975, libro III, cap. I, p. 62.
- 2 J.N.L. DURAND, *Compendio de lecciones de Arquitectura*, Madrid: Pronaos, 1981, p. 9.
- 3 Citado por B. BAILS, *Elementos de Matemática*: tomo IX, parte I: que trata de la arquitectura civil, Madrid: Impr. Vda. Ibarra, 1796. Reimpr. facsim. Murcia: Colegio Oficial de Aparejadores, 1983, p. 142.

Capítulo I

- 1 J.E. GORDON, *Structures*, Penguin Books, p. 38.
- 2 A. COLLIEU y D. POWNEY, *Propiedades mecánicas y térmicas de los materiales*, Barcelona: Reverté, 1977, p. 56.
- 3 E. BENVENUTO, *La scientia delle costruzioni*, p. 138.
- 4 E. BENVENUTO, op. cit. p. 321.
- 5 J.E. GORDON, op. cit. p. 38.
- 6 L. SERRALLACH, *Construcción y manipulación de materiales*, Curso 1873- 1874. Apuntes de clase tomados por Leandre Albareda, p. 410.
- 7 L. SERRALLACH, op. cit. p. 520.
- 8 J. BASSEGODA, *Apuntes depositados en la Cátedra Gaudí*.
- 9 G. BLACHÈRE, *Saber construir*, Barcelona: ETA, 1978.
- 10 COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN, *Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado*: EH-82, Madrid: MOPU, 1982, art. 26.7.
- 11 H. COWAN, *The master builders*, John Wiley and sons, 1977, p. 150.
- 12 C. ESSELBORN, *Tratado General de Construcción*, Barcelona: G. Gili, 1940, p. 66.

Capítulo II

- 1 Q. TERRY, *Seven misunderstandings about classical architectures*, Architectural Design, Londres, Academy Editions, 1981, p. XII.
- 2 A. COLLIEU y D. POWNEY, op. cit. p. 57.
- 3 G. BLACHÈRE, op. cit. cap. II, p. 113.
- 4 BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, «BRE Digest», núms. 227, 228 y 229.
- 5 B. ALLEN, «Active Buildings», «Architects' Journal», 23 julio 1980, p. 182.
- 6 D. LENCZNER, *Movements in Buildings*, Oxford: Pergamon Press, p. 60.

- 7 L. ADDLESON, «Building Failures», «Architects' Journal», 13 septiembre 1978.
- 8 L. SERRALLACH, op. cit. cap. II, p. 668.
- 9 BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, «BRE Digest», núm. 228.

Capítulo III

- 1 R. MARTIN, *Manuel d'Architecture Grecque*, París: Picavel, 1965, p. 373.
- 2 R. MARTIN, op. cit. p. 376.
- 3 M. VITRUBIO, *Los diez libros de arquitectura*, traducidos del latín y comentados por Joseph Ortiz, Madrid: Imprenta Real, 1787. Reimpr. facsim. Oviedo: Colegio Oficial de Aparejadores, 1974, libro II, cap. VII, p. 26.
- 4 M. BLAKE, *Ancient Roman Construction*, Carnegie Institution of Washington, 1947, p. 351.
- 5 M. BLAKE, op. cit. p. 228.
- 6 M. BLAKE, *ibid.*
- 7 M. BLAKE, op. cit. p. 248.
- 8 M. BLAKE, op. cit. p. 254.
- 9 M. BLAKE, op. cit. p. 228.
- 10 VIOLLET-LE-DUC, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française*, París: Bance, 1858, p. 4.
- 11 VIOLLET-LE-DUC, op. cit. p. 12.
- 12 VIOLLET-LE-DUC, op. cit. p. 13.
- 13 VIOLLET-LE-DUC, op. cit. p. 50.
- 14 VIOLLET-LE-DUC, op. cit. p. 180.
- 15 R. MARK, *Experiments in gothic structures*, Cambridge: Massachusetts MIT Press, 1982 p. 58 y sig.
- 16 FRAY LORENZO de SAN NICOLÁS.
- 17 RONDELET, *L'art de bâtir*, París.
- 18 TRUÑO, *Text sobre la construcció de voltes*. Depositado en COACB.
- 19 COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN, *Instrucción...* EH-82, art. 26.8.
- 20 BRS, op. cit.
- 21 G. BLACHÈRE, (Chabriol como colaborador), op. cit. cap. II, p. 134.
- 22 G. BLACHÈRE, (Chabriol como colaborador), op. cit. cap. II, p. 139.
- 23 J. BASSEGODA, op. cit. cap. II, p. 830.
- 24 G. BLACHÈRE, op. cit. cap. II, p. 158.
- 25 L. B. ALBERTI, op. cit. libro II, cap. 0, p. 48.
- 26 L. B. ALBERTI, op. cit. libro III, cap. I, p. 62.

Capítulo V

- 1 J. de VILLANUEVA, *Arte de albañilería*, Madrid: F. Martínez Dávila, 1827. Reimpr. facsim. Madrid: Velázquez, 1977, p. 8.
- 2 L. SERRALLACH, op. cit. cap. II, p. 389.
- 3 L. SERRALLACH, op. cit. cap. II, p. 402.
- 4 VARRON, citado por M. BLAKE, op. cit. p. 325.
- 5 M. BLAKE, op. cit. p. 326.
- 6 F. CARDELLACH, *Filosofía de las estructuras*. Barcelona: Bosch, 1910, p. 81.

- 7 A. CHOISY, *L'art de bâtir chez les romains*, París: Ducher, 1873, p. 16.
- 8 M. BLAKE, op. cit. p. 337.
- 9 H. COWAN, op. cit. cap. II, p. 59.
- 10 H. COWAN, op. cit. cap. II, p. 64.
- 11 COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN, *Instrucción...* EH-82, op. cit., art. 5.
- 12 F. CARDELLACH, op. cit. p. 79.
- 13 COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN, *Instrucción...* EH-82, op. cit., art. 16.1.

Capítulo VI

- 1 M. VITRUBIO, op. cit. libro VII, cap. IV, p. 173.
- 2 J. de VILLANUEVA, op. cit. cap. VI, p. 72.
- 3 J. de VILLANUEVA, op. cit. cap. VI, p. 74.
- 4 J. de VILLANUEVA, op. cit. cap. VI, p. 79.
- 5 L. SERRALLACH, op. cit. cap. II, p. 621.
- 6 L. SERRALLACH, op. cit. cap. II, p. 622.
- 7 L. SERRALLACH, op. cit. cap. II, p. 625.
- 8 J. de VILLANUEVA, op. cit.
- 9 M. VITRUBIO, op. cit. cap. IV, libro VII, cap. III, p. 175.
- 10 J. de VILLANUEVA, op. cit. cap. VI, p. 79.
- 11 FRAY LORENZO de SAN NICOLÁS, op. cit., p. 123.
- 12 L. SERRALLACH, op. cit. cap. VI, p. 79.
- 13 M. VITRUBIO, op. cit. cap. IV, p. 173.
- 14 B. BAILS, *Diccionario de arquitectura civil*, Madrid: Impr. Vda. Ibarra, 1802. Reimpr. facsim. Oviedo: Colegio Oficial de Aparejadores, 1973.
- 15 MATA LLANA, 1848.
- 16 M. MARTÍNEZ-ÁNGEL, *Tecnología de los oficios de la Construcción*, 2ª. edición, Madrid: Imp. Juan Pueyo, 1930, tomo II, p. 255.
- 17 A. PRADO y M. GUERRA, *Revestimientos con aglomerantes hidráulicos*, Madrid: Instituto Eduardo Torroja, p. 110.
- 18 J. BASSEGODA, op. cit. cap. II, lección 87.
- 19 A. PRADO y M. GUERRA, op. cit. p. 106.
- 20 P. BENAVENT, *Com he de construir*, 2a. ed., Barcelona: Favència, 1934, p. 27.
- 21 A. PRADO y M. GUERRA, op. cit. p. 126.
- 22 M. FORNÉS GURREA, *El arte de edificar*, Valencia: Impr. de Cabrerizo, 1857. Reimpr. facsim. Madrid: Ediciones Poniente, 1982, p. 45.
- 23 P. BENAVENT, op. cit. p. 29.
- 24 L. SERRALLACH, op. cit. cap. II, p. 63.

Capítulo VII

- 1 F. CARDELLACH, op. cit. p. 78.
- 2 J. de VILLANUEVA, op. cit. cap. VI, p. 11.
- 3 F. CARDELLACH, op. cit. p. 11.
- 4 E. RODRÍGUEZ BALBÍN, *Prólogo al Diccionario de BAILS*, op. cit.

- 5 F. CASSINELLO, *El ladrillo y sus fábricas*. Madrid: Instituto Eduardo Torroja.
- 6 M. VITRUBIO, op. cit. cap. IV, libro II, cap. 8, p. 44.
- 7 FRAY LORENZO de SAN NICOLÁS, op. cit. cap. VI, cap. XXXV, p. 86.
- 8 M. FORNÉS GURREA, op. cit. cap. VII, p. 23.
- 9 J. de VILLANUEVA, op. cit. cap. VI, p. 62.
- 10 P. SAN PAOLESÍ, *La cupola di Sta. Maria dei Fiori*, Firenze: Adam, 1977.
- 11 DECSA.
- 12 L. SERRALLACH, op. cit. cap. II, p. 389.
- 13 L. SERRALLACH, op. cit. ibid.
- 14 FRAY LORENZO de SAN NICOLÁS, op. cit. cap. VII, p. 86.
- 15 J. de VILLANUEVA, op. cit. cap. VI, p. 41.
- 16 FRAY LORENZO de SAN NICOLÁS, op. cit. cap. VII, p. 102.
- 17 F. CARDELLACH, op. cit. p. 85.

Capítulo VIII

- 1 R. MARTÍN, op. cit. p. 201.
- 2 CEB, *Recomendaciones internacionales para las estructuras formadas por paneles*, R. 72.42.
- 3 CEB, op. cit. R. 72.41.
- 4 R. MARK, op. cit., p. 32 y 73.
- 5 L. SERRALLACH, op. cit. p. 365.
- 6 RONDELET, op. cit. p. 350.
- 7 RONDELET, op. cit. p. 27.
- 8 RONDELET, op. cit. p. 31.
- 9 RONDELET, op. cit. p. 383.
- 10 A. CHOISY, *Histoire de l'Architecture*, París: lib. Georges Baranger, 1943, vol. II, p. 25.
- 11 I. PARICIO, *Análisis de las áreas de compatibilidad entre industrialización y construcción: Anexo*, Barcelona: ETSAB, 1979. Tesis doctoral.
- 12 R. MARTÍN, op. cit. p. 185.
- 13 A. LUCCHETTI e I. PARICIO, "Ciudad Badia. ¿Un modelo con futuro?", «CAU», núm. 43, mayo-junio 1977, p. 65-70.

Capítulo IX

- 1 L. MARTÍN, op. cit.
- 2 A. CHOISY, op. cit. vol II, p. 478.

Capítulo XI

- 1 I. PARICIO, op. cit.
- 2 B. CORIAT, *Ciencia, técnica y capital*, Barcelona: Blume, 1976.
- 3 G. BLACHÈRE, op. cit. cap. II.
- 4 S. HUTH, *Construir con células tridimensionales*, Barcelona: G. Gili, 1977, p. 14.
- 5 S. GIEDION, *La mecanización toma el mando*, Barcelona: G. Gili, 1978.
- 6 L. WINNER, *La tecnología autónoma*. Barcelona: G. Gili, 1980.

