

# CONSTRUCCIÓN Y ARQUITECTURA INDUSTRIAL PARA EL SIGLO XXI: UN ANÁLISIS PRELIMINAR

(DESIGN AND CONSTRUCTION OF INDUSTRIAL COMPLEXES FOR THE 21<sup>st</sup> CENTURY: A PRELIMINARY ANALYSIS)

M. P. de la Cruz López; A. del Caño Gochi, Escuela Politécnica Superior. Univ. de La Coruña

Fecha de recepción: 26-IV-2001

ESPAÑA

130-4

## RESUMEN

*El presente artículo expone un análisis preliminar realizado por los autores sobre la evolución histórica de los principales aspectos de la construcción y arquitectura industrial, así como de las posibles líneas que podría seguir la evolución a futuro de cada uno de dichos aspectos. Los aspectos analizados son: el desarrollo industrial; los métodos de cálculo y dimensionamiento estructural; las herramientas de diseño; los materiales de construcción; las tipologías estructurales; los sistemas constructivos no estructurales; la tecnología de los procesos constructivos; la prefabricación e industrialización; la organización y dirección del proyecto; la mano de obra para la construcción; los aspectos energéticos; las tecnologías y filosofías de fabricación y su mano de obra; el respeto al medio ambiente; la estética; el urbanismo industrial; y otros aspectos como la seguridad, la recuperación de construcciones industriales históricas, o la localización y emplazamiento, entre otros. Algunas de las conclusiones son específicas de la construcción y arquitectura industrial, mientras que otras son también comunes al resto de los sectores de la construcción.*

## Introducción

Con motivo del 150 aniversario de la ingeniería industrial, el Departamento de Ingeniería Industrial II, de la Universidad de La Coruña, está desarrollando varios proyectos para analizar la evolución y futuro de algunos campos de la ingeniería industrial. En particular, el que aquí se presenta supone un análisis preliminar en el campo de las construcciones industriales, fundamentalmente en el entorno de los países occidentales. Este trabajo constituye la primera fase del proyecto, y se ha desarrollado desde finales del año 2000 hasta julio de 2001.

## SUMMARY

*This paper presents a preliminary analysis, performed by the authors, on the past, present and possible future of the main issues related to the design and construction of industrial complexes. Among others, those issues include the industrial development; structural analysis and design methods; design tools; construction materials; structural types; types of non-structural systems (facade, roof, building services); technology of construction processes; precast and industrialized systems; construction project management; construction labor; energy-related features of the industrial complexes; methodologies, technology and labor for manufacturing; environmental issues; aesthetics; planning of industrial areas (industrial parks, technology parks); industrial plants location. Some conclusions are specific to the design and construction of industrial complexes, whereas other are common to the other construction sub-sectors.*

Por otro lado, una de las raíces genéricas de este estudio es tratar de anticiparse a las necesidades de formación de los futuros ingenieros industriales, en general, en las materias relacionadas con la ingeniería de la construcción y, en particular, en la asignatura denominada "construcción y arquitectura industrial" que:

- . Por un lado, actualmente es considerada como asignatura troncal en los planes de estudios de esta carrera universitaria.
- . Por otro lado, da sentido a una de las intensificaciones de la carrera de ingeniería industrial, que es la de

construcciones industriales, presente en algunas de las Escuelas Técnicas Superiores, como la de la Universidad Politécnica de Madrid o la de la Universidad de La Coruña, entre otras.

Se trata de un campo de la ingeniería industrial cuyos proyectos han sido a menudo fuente de polémica y origen de demandas ante los tribunales entre ingenieros y arquitectos y que, en el futuro, es probable que en él suceda lo que puede suceder en el resto de los campos de la construcción y, en general, de la técnica; que no brinde un "coto privado" a ninguna profesión, sino más bien la necesidad ineludible de colaboración entre técnicos de todo tipo, fundamentalmente ingenieros y arquitectos.

El análisis de la evolución histórica y de la posible evolución a futuro de las construcciones industriales que se está realizando se ha estructurado, por el momento, en los propios elementos de la construcción y arquitectura industrial y en los factores que influyen en ella. El desglose, a efectos de este artículo, será el siguiente:

- . Desarrollo industrial.
- . Métodos de cálculo y dimensionamiento estructural, y normativa al respecto.
- . Herramientas de diseño.
- . Materiales estructurales y no estructurales.
- . Tipologías estructurales.
- . Sistemas constructivos no estructurales.
- . Tecnología de los procesos constructivos.
- . Prefabricación e industrialización.
- . Organización y dirección del proyecto.
- . Mano de obra para la construcción.
- . Aspectos energéticos.
- . Tecnologías y filosofías de fabricación y su mano de obra.
- . Respeto al medio ambiente.
- . Estética.
- . Urbanismo industrial.
- . Otros aspectos (seguridad, habitabilidad, recuperación de construcciones industriales históricas, localización, etc.).

Hay que señalar que en algunos de estos campos, como se podrá apreciar a continuación, los avances han ido -o irán- de la mano de la construcción en otros sub-sectores, y la construcción industrial se enriqueció o se enriquecerá con ellos. Por el contrario, algunos de los avances han ido -o irán- de la mano de la construcción industrial, y el resto del sector de la construcción se ha enriquecido o se enriquecerá con ellos. Por ejemplo, durante la historia de la construcción los principales avances habidos en materiales estructurales y en tipologías estructurales se han registrado como solución a las estructuras de grandes

luces y grandes cargas en la obra pública, especialmente en el caso de los puentes. Y el resto del sector de la construcción se ha aprovechado de ellos. A la inversa, las técnicas actuales usadas en las viviendas domóticas y en los edificios de oficinas de alta tecnología (denominados también con el término "edificios inteligentes", menos adecuado) son las mismas (e incluso más sencillas) o están basadas en las que hace ya muchos se usan en la automatización y robotización de plantas industriales. Otras veces, sin embargo, es difícil separar claramente el sub-sector del que ha partido el avance, o el avance es común para todo el sector.

Por último, y antes de entrar en detalle en cada uno de los aspectos o campos que se han enumerado, hay que decir también que, como se irá viendo, existen interrelaciones entre dichos campos y entre sus respectivas evoluciones pasadas y futuras.

### Desarrollo industrial

Se ha seguido un proceso evolutivo (Heredía, 1992; Derry y Williams, 1993; Kirby et al., 1990; Rubio y Zárate, 1995) desde la fabricación artesanal en la sociedad pre-industrial hasta la sociedad pos-industrial actual. La fabricación artesanal existente hasta el siglo XVIII se basaba en la tradición y el legado de padres a hijos, con pequeños talleres por gremios situados en determinados barrios, con núcleos de fabricación de pequeña dimensión y enquistados en las ciudades, en un entorno que no es, ni mucho menos, el de abastecimiento masivo de materias primas o de energía, ni tampoco el de salida masiva de productos terminados.

En el siglo XVIII llega la revolución industrial de la mano (1769) de la máquina de vapor (figura 1). Es el nacimiento de la industria como tal; aparece la fábrica (figura 2) y desaparece el taller familiar. Ahora hay una gran cantidad de personas en el centro de producción (la fábrica). Sigue

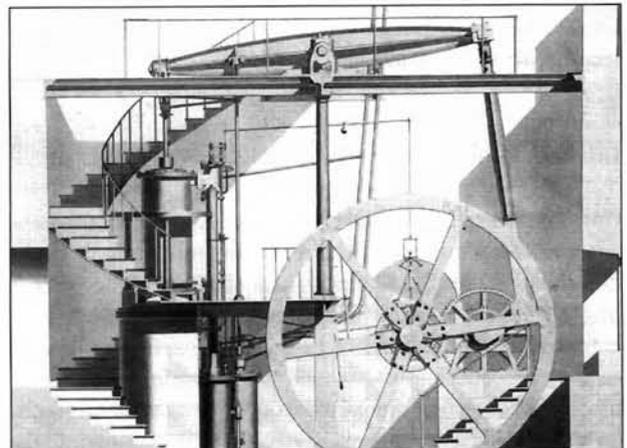


Figura 1.- Máquina de vapor, año 1830 (fuente: CEHOPU, 1996).



Figura 2.- Complejo Boott Mill, Lowell, Ma, EEUU, 1821 (fuente: <http://www.bc.edu/bc-org/avp/cas/fnart>, Boston College, Fine Arts Department, "A Digital Archive of American Architecture, Prof. Jeffery Howe).



Figura 3.- Factoría de aluminio de la extinta Empresa Nacional del Aluminio, S.A. (Endasa), Valladolid, 1969; esta factoría contaba con poblado laboral, economato, instalaciones deportivas y zonas de ocio (fuente: anónimo, 1969).

habiendo una importante promiscuidad fábrica-ciudad. Lo importante es producir, la persona importa poco. Se genera una gran contaminación ambiental sin preocupación alguna al respecto.

A principios del siglo XX aparece el taylorismo, la organización "científica" del trabajo. Se trata de utilizar secuencias lógicas de trabajo, operaciones previstas, series, ahorro de tiempo, evitar tiempos muertos. A pesar de las inquietudes de finales del siglo XIX, a la persona no se le concede todavía gran valor.

La presión social es cada vez mayor y a mitad del siglo XX se comienza a conceder atención a la persona. La persona exige que la máquina sea quien le sirva a ella, y no ella a la máquina, exige un proceso correcto y racionalmente organizado y condiciones laborales adecuadas. En ese momento, por tanto, las construcciones industriales tratan de conseguir fábricas adecuadas para una producción eficaz, con un buen ambiente de trabajo, con servicios sociales y, a veces, culturales y deportivos. Se llega a la generación de complejos industriales con poblados laborales, economatos, instalaciones deportivas, bibliotecas, zonas de ocio y otras infraestructuras culturales (figura 3).

Finalmente, en las últimas décadas del S. XX el trabajador occidental sigue reclamando un ambiente favorable, pero lejos de modelos paternalistas (instalaciones sociales, culturales o deportivas; Japón no ha ido por este camino) y "huye" del trabajo fuera de su horario. La presión social ha llevado a un mayor respeto medioambiental (reciclaje, de recuperación energética, etc.) (Spiegel y Meadows, 1999), que ha enriquecido el concepto de construcción y arquitectura industrial. Y, por último, ha habido una influencia clara de las nuevas tecnologías de fabricación (Sistemas Avanzados de Fabricación) (figura 4): automatización, robotización, fabricación flexible, fabricación asistida por ordenador, fabricación integra-



Figura 4.- Automatización y robotización de procesos en SEAT.

da por ordenador) y de las nuevas filosofías de fabricación (calidad total, producción justo a tiempo, etc.).

En este apartado de desarrollo industrial, la posible evolución que pueda darse en el futuro está viniendo de la mano de la globalización y su influencia en los puntos de toma de decisiones empresariales, con el desplazamiento de actividades industriales de tecnologías menos respetuosas con el medio ambiente o menos innovadoras fuera de los países más civilizados, entre otros aspectos. Es esperable que la presión social siga aumentando para que el respeto al medio ambiente sea mayor y para que la consideración de la persona cambie a mejor. Debe tenerse en cuenta que las impresionantes mejoras en la productividad (Racionero, 2000) no se han traducido en un horario laboral más reducido (lo que hubiera repartido el trabajo y evitado el paro estructural), ni tampoco en un incremento de los salarios que realmente

eleve el poder adquisitivo (en los sesenta, por ejemplo, el salario del cabeza de familia en España servía sin grandes problemas para mantener a toda su familia, con una cantidad de hijos bastante importante; hoy por hoy, en las grandes ciudades y en muchas de las no tan grandes, las parejas se ven obligadas a que ambos trabajen para poder mantener una familia mucho más reducida en descendencia que la de antes). Por decirlo de otra manera, la productividad ha subido espectacularmente, pero las condiciones económicas de los trabajadores no han mejorado a la par; en todo caso, han empeorado. Ello está ligado al incremento de la desigualdad entre las personas con las mayores y las menores percepciones económicas. Y contra ello, además de contra otras cosas, han surgido movimientos sociales también globales, como el propio movimiento anti-globalización (Klein, 2001). Las consecuencias de dicha presión social y de este tipo de movimientos son imprevisibles por ahora, pero probablemente llevarán a un mejor tratamiento del trabajador, a un mayor respeto de los países más avanzados hacia los menos avanzados y a un mayor respeto al medio ambiente. Y todo ello influirá en las fábricas. Las occidentales deberían ser cada vez más automatizadas y con trabajadores con mayor poder adquisitivo y menos horas de trabajo, y las de países menos avanzados ir pareciéndose más a las actuales de los países occidentales, abandonando prácticas (como la mano de obra infantil y, en general, la mano de obra apenas remunerada en instalaciones sin ningún tipo de seguridad ni confort) que en realidad son de tiempos de la revolución industrial (figura 5).

### Métodos de cálculo y dimensionamiento estructural, y normativa al respecto

En este aspecto ha habido también una evolución muy importante, pasándose del dimensionamiento sin cálculos (ITEA, 2000), basado en la pura experiencia y en el ensayo a escala real (desde la antigüedad hasta bien entrado el siglo XIX), hasta los modernos métodos computacionales



Figura 5.- Mano de obra del complejo textil Atherton Cotton Mill, Charlotte, EEUU, 1890 (fuente: <http://cmhpf.org>, Charlotte-Mecklenburg Historic Landmarks Commission, Charlotte and Mecklenburg County, EE UU).

(Alarcón et al., 2000), pasando por el cálculo gráfico; los métodos aproximados como el de Cross (figura 6), tantas veces resuelto con regla de cálculo; los métodos energéticos (como el PTV) clásicos; los avances en simulación en laboratorio de estructuras a escala reducida; la irrupción de los ordenadores, el uso de las técnicas básicas del cálculo numérico (cálculo matricial) (figura 7) y, simultáneamente, el desarrollo de técnicas para el cálculo plástico, el análisis de la inestabilidad elemental y global, la fiabilidad o las uniones semirrígidas, entre otros aspectos; el paso de tensiones admisibles a estados límite; la evolución en coeficientes de seguridad y combinaciones de cargas; el perfeccionamiento de los ensayos de laboratorio con cargas de viento, dinámicas y sísmicas; el uso de las técnicas más avanzadas de cálculo numérico (elementos finitos, bandas finitas, elementos de contorno); los avances en cálculo dinámico y sísmico; y la correspondiente evolución en la normativa que contempla todo lo anterior.

Quizá éste es uno de los campos en que la posible evolución a futuro no será tan espectacular como en los últimos tiempos, que han sido realmente especiales e irrepetibles (como la propia aparición del ordenador y su evolución). De todos modos, dicha evolución (Alarcón et al., 2000; ITEA, 2000) puede incluir aspectos potenciales como, entre otros:

- . La consideración de cerramientos y particiones en el cálculo ("estructura en su conjunto"), a efectos de rigidez.
- . Un uso, cada vez mayor, de técnicas computacionales complejas (más allá del mero cálculo matricial, con elementos finitos, bandas finitas, elementos de contorno, etc.), en un principio por el fabricante de sistemas industrializados de estructura metálica y de prefabricados de hormigón y luego, también, por las consultorías (lo que requerirá mucha formación en este campo para evitar, entre otras cosas, el peligro de generación de complejos modelos con pérdida de la realidad física de éstos, con el riesgo que ello supone en manos inexpertas).
- En materia de normativa, como es el caso del Eurocódigo, la tendencia, por lo pronto, es hacia normativa cada vez más compleja y más empírica, e incluso a veces con poco sentido físico, lo cual implicará la necesidad de más formación para el profesional en este aspecto.
- . La investigación de los procesos tensionales reales internos de las estructuras para mejorar los códigos de diseño existentes, por medio de la experimentación y de la simulación por ordenador, por ejemplo, y, dentro de ello, un mejor conocimiento del funcionamiento real de uniones semirrígidas en estructura metálica.

### Herramientas de diseño

En este campo, la evolución ha ido ligada a la aparición y evolución del ordenador: desde el dibujo en tablero (figura 8) hasta la visualización dinámica en tres dimensiones

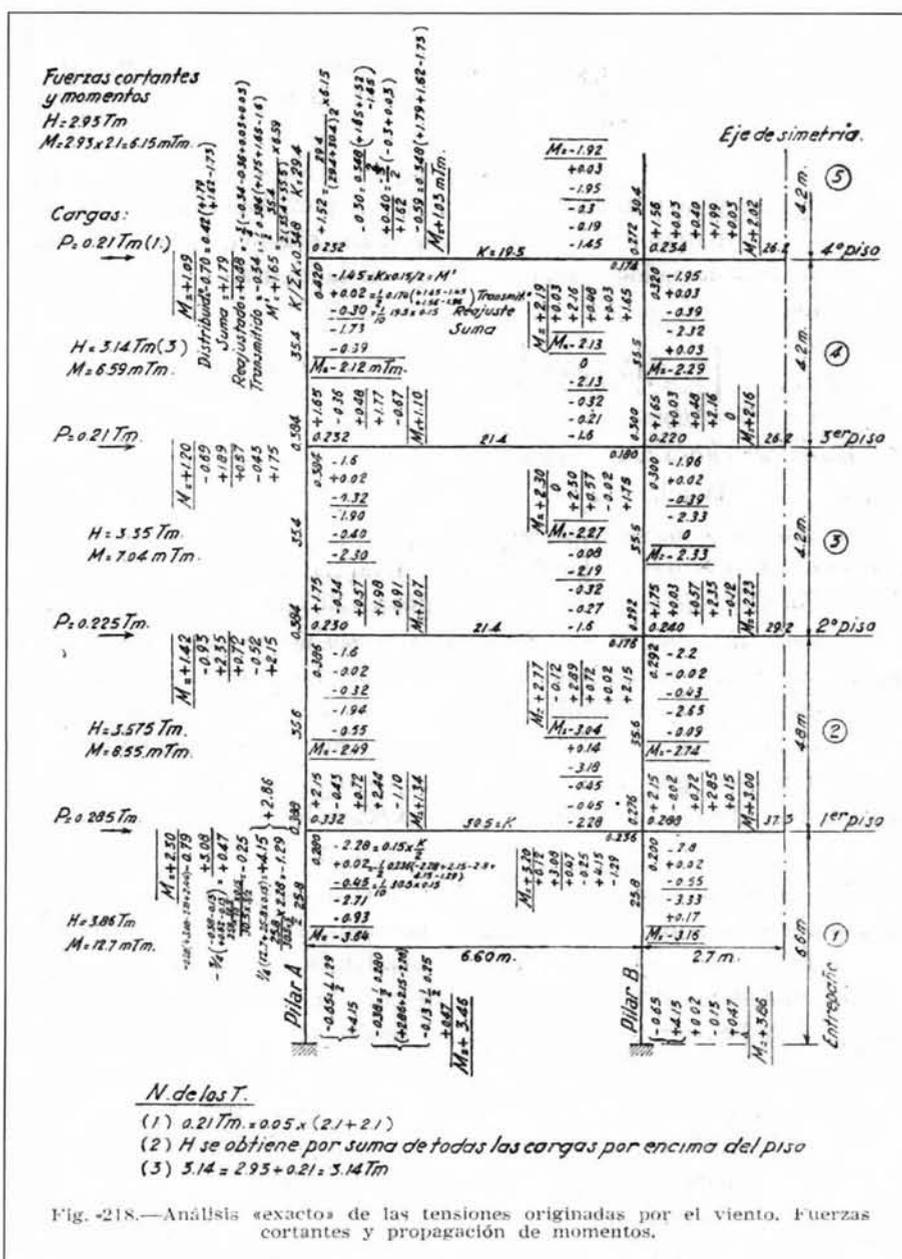


Figura 6.- Cálculo estructural por el método de Cross (fuente: Cross y Morgan, 1953).

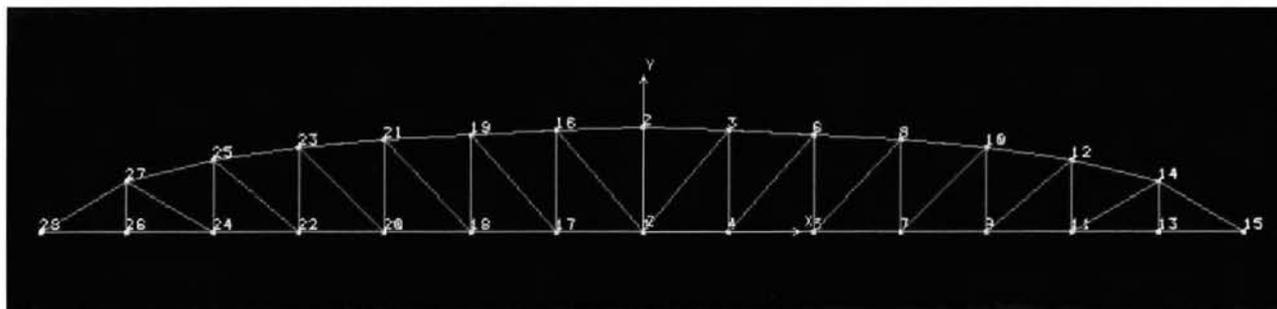


Figura 7.- Cálculo matricial de estructuras: modelización de una celosía metálica para un edificio industrial.

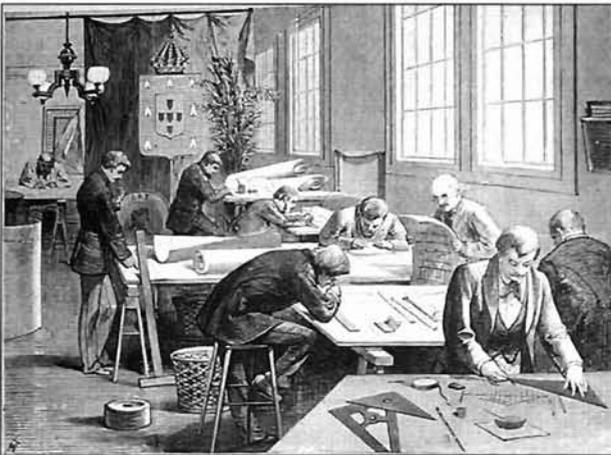


Figura 8.- Dibujo de planos en tablero, imagen de 1876 (fuente: <http://www.bc.edu/bc-org/avp/cas/fnart>, Boston College, Fine Arts Department, "A Digital Archive of American Architecture, Prof. Jeffery Howe).

reales (3+1 D) (figura 9), pasando por las maquetas a escala (figura 10), por el cálculo y dimensionamiento asistido por ordenador, el dibujo asistido por ordenador y el diseño asistido por ordenador (del Caño y de la Cruz, 1993; Domínguez et al., 1995; Wagter, 1992).

En este campo, sin embargo, la espectacularidad y rapidez de la evolución no han sido tan elevadas como en el caso del cálculo y dimensionamiento porque la potencia computacional que se necesita es mucho más elevada y es, en estos momentos, cuando los ordenadores personales están empezando a tener potencia como para hacer simulaciones dinámicas en tres dimensiones, sin problemas graves. Por eso, en este campo, queda mucho por ver y quizá, además de la visualización y, por encima de ella, en cierto tiempo, se consolidará y se extenderá la integración de las herramientas de diseño en el concepto de Construcción Integrada por Ordenador (CIO); es decir, la integración vertical entre las diferentes fases del proyecto e integración horizontal entre las diferentes



Figura 9.- Visualización dinámica 3D en proyectos de construcción en una empresa de consultoría (Norman Foster and Associates).

disciplinas técnicas de la construcción (integración de diseño, cálculo, gestión del proyecto, ejecución in situ y mantenimiento y explotación), todo ello mezclado con la automatización y la robotización en la construcción. El lector puede ampliar la información sobre este concepto y sus técnicas asociadas en (del Caño y de la Cruz, 1993).

#### Materiales estructurales y no estructurales

En este campo, la evolución ha sido también espectacular (Allen y Iano, 1990; Amery, 1995; Derry y Williams, 1993; ITEA, 2000; Kirby et al., 1990; Merritt y Ricketts, 1997). Se ha pasado desde poco más de una decena de materiales esenciales (y muy bien conocidos) antes de la Segunda Guerra Mundial:

##### . Estructurales

- Madera.
- Pétreos naturales:
  - . Piedra para mampuestos o sillares.
  - . Áridos (para hormigones estructurales).
- Pétreos artificiales:
  - . Cemento para hormigón estructural.
  - . Cemento, yeso, cal viva y pasta de cal o cal hidratada,

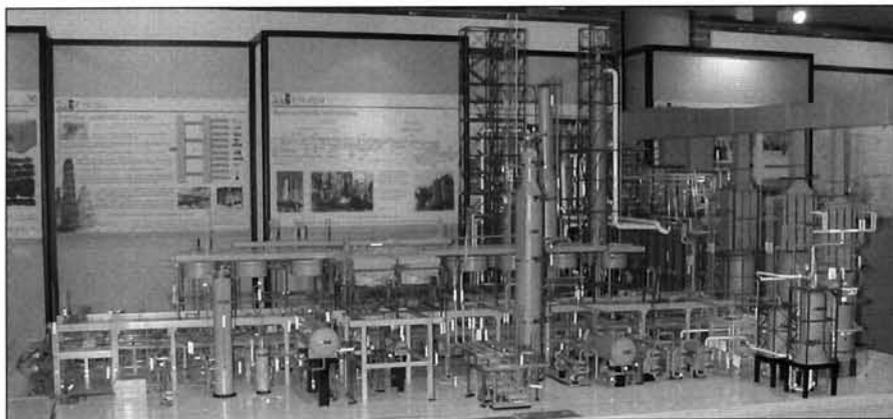


Figura 10.- Maqueta de una planta de desulfuración de naftas (fuente: exposición "150 Aniversario de la Ingeniería Industrial. Nuestra Industria y Nuestra Vida.", organizada por el Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid y la Comunidad de Madrid, Recinto Ferial Juan Carlos I, IFEMA, Madrid; maqueta de Técnicas Reunidas, S. A.).

para morteros con destino a muros portantes.

- . Arcilla cocida para ladrillos (o sin cocer, para adobes y tapial) con destino a muros portantes.

- Metálicos: hierro y acero.

- . **No estructurales**

- Madera.

- Pétreos naturales:

- . Piedra.

- . Áridos (para morteros).

- Pétreos artificiales:

- . Cemento, yeso, cal viva y pasta de cal o cal hidratada, para morteros.

- . Arcilla cocida para ladrillos, bovedillas y tejas (o sin cocer, para adobes).

- . Porcelana.

- . Vidrio.

- Metálicos: cobre, cinc, plomo, hierro y acero.

- Otros: caucho e, incluso, los primeros plásticos.

Hasta la aparición del concepto de sistema y la proliferación actual de cientos de materiales y sistemas (de sistemas constructivos no estructurales y de su evolución se habla más adelante), con el consiguiente aumento de la complejidad del diseño y de la ejecución. En cuanto a los materiales estructurales, se usan hoy hormigones (figura 11) de 50, 80 e, incluso, 130 MPa (1.300 kg/cm<sup>2</sup>) de resistencia característica a compresión, aceros especiales de muy alta resistencia para pretensado o madera laminada encolada. Y en cuanto a los materiales no estructurales, la lista sería interminable (piedras naturales, hormigón, múltiples aditivos al hormigón, hormigones celulares, morteros de cemento y yeso, morteros de retracción controlada, morteros cola, enfoscados monocapa, modernos hormigones y yesos proyectados, cartón-yeso, cerámica (ladrillo, bovedillas, tejas), porcelana, vidrio, vidrios dobles y triples, vidrios reflectantes, vidrios de seguridad, hierro, acero, acero inoxidable, acero corten, acero galvanizado, aluminio, duraluminio, cobre, madera, múltiples aglomerados de madera, corcho, PVC,



Figura 11.- Hoy en día se usan hormigones de 50, 80 e, incluso, 130 MPa (1.300 kg/cm<sup>2</sup>) de resistencia característica a compresión.

poliuretano, polietileno, poliéster, polipropileno, plexiglás, metacrilato, resinas epoxi, porexpan, poliuretano, neopreno, geotextiles, compuestos espumados aislantes, melamina, vitrocerámicas, cerámicas espumadas, kevlar, teflón, fibras de carbono, composites como el GRC, entre otros).

Al margen de las inevitables “modas” tendentes al hormigón o al acero en función de los empujes de la tecnología y de los subsectores industriales implicados y a pesar de la espectacular evolución habida en los materiales, este campo debería ver una gran evolución a futuro incluyendo (ITEA, 2000; Miravete, 1995; Spiegel y Meadows, 1999), entre otros aspectos potenciales, algunos como:

- . La utilización de acero estructural resistente a la corrosión atmosférica.

- . La utilización de acero estructural inoxidable.

- . Uso de revestimientos finos intumescentes (de escaso espesor, como la pintura) que generan espuma al ser sometidos al calor y protegen la estructura metálica en caso de fuego.

- . Plásticos para revestimientos protectores de estructura metálica (frente a la corrosión y el fuego).

- . Aleaciones que confieran al acero una mayor resistencia al fuego.

- . Uso del aluminio estructural.

- . Uso del titanio y sus aleaciones: menor corrosión, más ligero (la mitad que el acero), más resistencia.

- . Materiales metálicos con memoria de forma: por ejemplo, determinadas aleaciones de titanio sensibles a la temperatura y su posible uso para remaches.

- . Hormigones de resistencia característica mayor de 180 MPa (1.800 kg/cm<sup>2</sup>).

- . Hormigones de reciclaje.

- . Hormigones reforzados con fibras de vidrio, transparentes a ondas electromagnéticas (telecomunicaciones).

- . Hormigones reforzados con fibras de carbono, que suponen:

- una mayor resistencia,

- la posibilidad de medir automáticamente las solicitaciones que soporta el hormigón,

- la posibilidad de medir automáticamente deformaciones, y su posible uso como reflector de ondas de radio (escudo electromagnético).

- . Hormigón armado con barras de fibra de vidrio y resina de poliéster, o con barras de fibras de carbono con resinas epoxi (en vez de armaduras de acero), que carecerían de corrosión y serían muy ligeras, además de aportar características electromagnéticas, positivas o negativas (transparencia o apantallamiento a las ondas electromagnéticas) necesarias para el proceso industrial o para el servicio a que se destinase el edificio.

- . Cables sintéticos de aramida para ascensores y tensores, entre otras aplicaciones.

- . Materiales poliméricos reforzados con fibras sintéticas como material estructural, con más resistencia (más que el acero), ausencia de corrosión, mayor ligereza, carácter formáceo y fabricación industrializada (no in situ).

- . Materiales electrorreológicos que cambian de estado físico si se les atraviesa con una corriente eléctrica, como determinados hidrocarburos halogenados que son sólidos cuando pasa una corriente eléctrica a través de ellos y se vuelven gelatinosos/viscosos cuando dicha corriente desaparece; y sus posibles aplicaciones antisísmicas (entre otras) como parte de los cimientos (el terremoto se detecta por los instrumentos habituales para ello y automáticamente corta o disminuye la corriente eléctrica, lo que cambia la rigidez y el coeficiente de amortiguamiento del cimiento).

- . El posible uso de la arquitectura textil (membranas de teflón o de PVC reforzadas con fibras de vidrio o poliéster) en entorno industrial.

- . En general, la búsqueda de materiales que sean adecuados con respecto a un cada vez más amplio conjunto de criterios (como, por ejemplo, que sean reciclables, que además tengan buenas características de aislamiento térmico y buen comportamiento ante el fuego y en la absorción de ruidos).

Algunos de estos aspectos ya se han experimentado o se han usado a un nivel reducido en construcciones industriales.

### Tipologías estructurales

También ha habido una evolución importante en este campo (Amery, 1995; CEHOPU, 1996; Fernández-Ordóñez, 1990; Gössel y Leuthäuser, 1991; Heredia, 1992; ITEA, 2000; MacDonald, 1994; Mignot, 1983; Munce, 1961; Risebero, 1991; 1993; Sommer et al., 1995), pasando desde los edificios fabriles con muros portantes de fábrica de ladrillo o piedra y celosías simples de madera maciza



Figura 12.- Estructura de muros portantes de fábrica y celosías simples de madera en una fábrica de automóviles.

(figura 12) a los edificios actuales de grandes complejos en las que la imagen de empresa es esencial y se utilizan (figura 13) tipologías estructurales avanzadas (como son, entre otras, las cubiertas colgantes), muchas veces tomadas de otros sectores de la construcción (como ha sucedido con los puentes, o con los edificios singulares para estaciones de FFCC o para los grandes pabellones de exposiciones y ferias internacionales).

Es difícil que en este campo vuelva a haber, por lo menos en el corto y medio plazo, avances tan relevantes como fueron, en su momento, la estructura de hormigón armado y, sobre todo, el hormigón pretensado. En todo caso, la evolución a futuro podría incluir el uso de aspectos potenciales como (entre otros):

- . Cada vez mayor uso de soluciones pretensadas de diferentes tipos y con diferentes materiales (acero, hormigón).

- . Uso de estructuras temporales inflables o soportadas por aire.

- . En general, formas estructurales cada vez más activas (MacDonald, 1994), como es el caso del arco frente a los pórticos ortogonales.

- . Estructuras de acero tubulares ignífugas mediante agua (ITEA, 2000).

- . Estructuras "inteligentes" con componentes y estructura completa que puedan detectar un cambio en la temperatura, presión, sollicitaciones (incluido el sismo, con materiales avanzados con memoria de forma, fluidos electrorreológicos, etc.) y con sistemas que realizan un diagnóstico e inician la acción apropiada para preservar la integridad estructural y continuar prestando sus funciones.

- . Diseño antisísmico y contra el viento de estructuras con amortiguadores dinámicos en caso de la necesidad de edificaciones industriales en altura en zonas de gran incidencia sísmica, si es que la saturación de las ciudades llevase a la necesidad de este tipo de edificaciones.



Figura 13.- Fábrica de microprocesadores Inmos (fuente: Phillips, 1993).

### Sistemas constructivos no estructurales

Como se ha dicho anteriormente, el concepto de sistema es reciente (posterior a la Segunda Guerra Mundial). Antes se usaban los materiales directamente para construir y, ahora, si bien algunos materiales se siguen usando de manera directa, hay muchos tijos cuya ejecución consiste en el mero montaje, más o menos complejo, de un sistema constructivo que suministra el mismo fabricante y que consta de varios materiales. En este campo se ha pasado, por tanto, desde la ejecución in situ de cerramientos, cubiertas e instalaciones con un muy escaso número de materiales (ya comentados, antes de la Segunda Guerra Mundial), hasta los innumerables sistemas (Amery, 1995; Merritt y Ricketts, 1997; Mignot, 1983; Munce, 1961; Phillips, 1993; Risebero, 1991; 1993; Slessor, 1997; Sommer et al., 1995) más o menos industrializados de hoy en día (figura 14), muchos de ellos bajo patente.

Por otro lado, como se dijo al principio, las instalaciones de proceso se han visto, poco a poco, inmersas en un proceso creciente de automatización y robotización. De manera análoga, las instalaciones generales y auxiliares

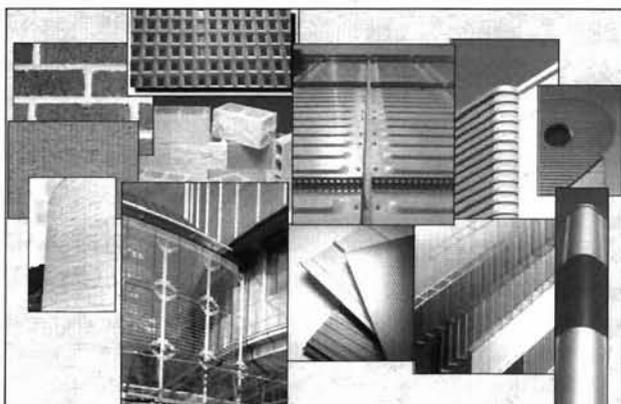


Figura 14.- Algunos sistemas constructivos para fachadas de edificios industriales y similares.

de proceso (en las cuales también se ha introducido el concepto de sistema), han tenido una evolución en cuanto a su perfeccionamiento tecnológico y en cuanto a la automatización de su control que, como se ha referido con anterioridad, ha dado lugar posteriormente aparte del concepto de edificios de alta tecnología (para uso no industrial) (Díaz, 1993) y, como un subsistema de ello, a la domótica.

La evolución en este campo ha sido muy importante y es probable que lo siga siendo, incluyendo a futuro aspectos potenciales como (entre otros):

- . Sistemas de automatización de la actividad y del control de las instalaciones: aumento del alcance y del uso de estos sistemas.
- . Proliferación todavía mayor de sistemas constructivos industrializados, con el correspondiente incremento de la complejidad de diseñar y ejecutar, incluido el de sistemas integrales prefabricados (construcciones completas).
- . Uso cada vez mayor de materiales artificiales respetuosos con el medio ambiente, como la piedra artificial, que, además, es reciclable.

### Tecnología de los procesos constructivos

Este aspecto tiene muchísimas vertientes (Allen y Iano, 1990; Amery, 1995; Illingworth, 2000; Merritt y Ricketts, 1997) y valgan un par de muestras para ello. En uno de sus campos, la topografía, se ha pasado desde la dioptra al nivel y el teodolito, y luego a la estación total, el GPS (y, por tanto, la utilización del satélite) y los sistemas de gestión de la información geográfica (GIS). En otra parcela, como es la de movimientos de tierras, se ha pasado del pico y la pala (figura 15) y la entibación con tablones a las modernas máquinas de movimiento de tierras (figura 16), a los topes tuneladores o a la congelación del terreno (Harris, 1995). Y en el apartado de transporte, se

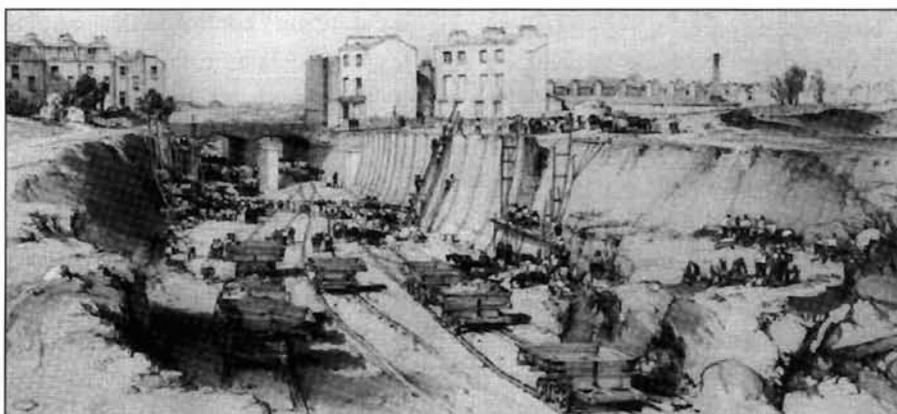


Figura 15.- Movimientos de tierras para la construcción de muros de contención de FFCC en Inglaterra (revolución industrial).



Figura 16.- Máquinas modernas de movimiento de tierras, topo tunelador y congelación del terreno para reparaciones en una nave industrial (fuente: Harris, 1995).

ha pasado de la cuerda, la polea, la rampa, la grúa de madera y la energía humana y animal a las grúas torre y pluma actuales, los transportes especiales por carretera para cargas de decenas de toneladas y de decenas de metros de longitud, las grúas especiales para la ejecución de puentes por dovelas lanzadas o los artefactos para transportar edificios enteros. La posible evolución a futuro en este campo tendrá muchas facetas incluyendo, en uno de sus extremos, tecnologías que (entre otros aspectos) podrían ser necesarias para construir complejos mineros e industriales fuera de nuestro planeta (Johnsson et al., 2000).

### Prefabricación e industrialización

En esta faceta (Burón y Fernández-Ordóñez, 1997; ITEA, 2000) se ha pasado de la ejecución in situ de la práctica totalidad de la obra hasta los modernos sistemas integrados en los que el grado de prefabricación (figura 17) se acerca cada vez más a la totalidad, tanto en estructura como en cerramientos, cubiertas, particiones e instalaciones. Su posible evolución a futuro puede incluir potenciales aspectos, que llevarán a un mayor grado de prefabricación e industrialización (Warzawsky, 1999), como la automatización y la robotización (figura 18) (ISARC, 1999; Stone, 2000; Warzawsky, 1999), tanto de la ejecución in situ como de la industrialización de la construcción; y su integración con las herramientas de diseño y cálculo, de gestión del proyecto, de ejecución in situ y de mantenimiento y explotación en el nuevo concepto de Construcción Integrada por Ordenador (CIO) (del Caño y de la Cruz, 1993; Wagter, 1992). Un mayor uso de la prefabricación e industrialización supone la necesidad de resolver algunos problemas actuales (por ejemplo, la influencia de este aspecto en la redacción inicial del proyecto; consenso entre suministrador, diseñador y propiedad), que no suponen grandes dificultades.

### Organización y dirección del proyecto

En la organización y dirección del proyecto se ha pasado (Morris, 1994) de la mera programación de plazo y coste

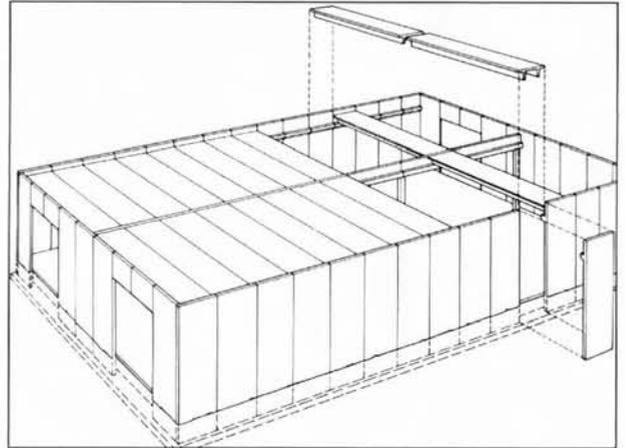


Figura 17.- Edificio industrial prefabricado (fuente: Allen y Iano, 1990).

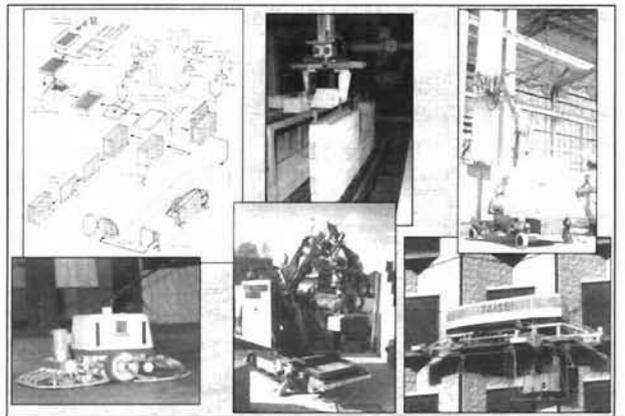


Figura 18.- Automatización y robotización de la ejecución in situ y de la industrialización de la construcción (fuentes: ISARC, 1999; Warzawski, 1999).

de las primeras aplicaciones en el sector de la construcción por parte de la empresa industrial Du Pont de Nemours en los inicios de la dirección de proyectos, hasta el actual conjunto de conocimientos (AEIPRO, 2001; Morris, 1994; Project Management Institute, 2000) que incluyen:

- . la definición y control de alcance, plazo, coste y calidad,
- . la gestión del riesgo, de la contratación y compras, de las comunicaciones, de la información y de los recursos humanos del proyecto,
- . y la planificación y el control global del proyecto teniendo en cuenta todas las anteriores funciones.

Su posible evolución a futuro podría incluir (Blockley y Godfrey, 2000; Morris, 1994; del Caño y de la Cruz, 1998) aspectos potenciales como (entre otros):

- . Mayor necesidad de equipos multidisciplinares, el profesional libre que realiza proyectos completos puede llegar a desaparecer completamente; la colaboración en-

tre arquitectos, ingenieros y otros tipos de profesionales será imprescindible para dichas profesiones.

- . Mayor diversificación y globalización de las empresas de consultoría y contratistas.
- . Mayor variedad todavía de tipologías de contratación, tipos de precio y, en general, clausulados contractuales.
- . Aumento de contratos de tipo concesión (*Build Operate Transfer*; Construir Operar Transferir) y sus derivados, y su aprovechamiento por las Administraciones de los Estados para aumentar las infraestructuras al servicio de los ciudadanos sin aumentar el déficit público.
- . Mayor profesionalización en materia de dirección de proyectos de las empresas propietarias y mayor contratación de consultorías para apoyo en la dirección de proyectos.
- . En algunos casos, aumento de la contratación llave en mano (*design+build*) para minimizar interlocutores y simplificar la dirección de proyectos.
- . Aumento de contratación con tipologías de precios y con cláusulas que disminuyan la rivalidad contractual (*partnering*), tanto en relaciones a corto como a largo plazo.
- . Aumento del uso real efectivo de las técnicas de análisis y gestión de riesgos de todo tipo (retrasos, sobrecostes, bajas en calidad, accidentes, etc.).
- . Lógica difusa, redes neuronales, sistemas expertos, sistemas basados en el conocimiento y su aplicación a la dirección del proyecto.
- . Generación de estándares nacionales e internacionales para todo tipo de servicios y sistemas de contratación en proyectos de construcción.
- . Estudio de selección del emplazamiento: aparición en España y posible implantación obligatoria en nuestro país para evitar problemas que perjudiquen los objetivos del proyecto, contrastando, para los posibles terrenos a adquirir (una vez decidida la localización): calificación urbanística, apoyo existente a la actividad industrial (o comercial, etc.), infraestructuras de servicios, posibilidades logísticas, topografía, estudio geotécnico convencional y análisis de la contaminación del suelo.
- . Mayor concienciación por parte del arquitecto en todo lo que no es diseño conceptual, distribución del espacio y el volumen, formas y estética, así como una mayor orientación al cliente por parte de estos profesionales.
- . Mayor concienciación del ingeniero de la importancia de las formas y la estética en la construcción.
- . Mayor participación del arquitecto en la construcción y arquitectura industrial (y la recíproca, que no es objeto de este análisis, con mayor participación del ingeniero en obras no industriales). Es decir, como se había anticipado, el proyecto y la obra de cualquier tipo diseñado y dirigida por equipos multidisciplinares bajo el mando de un profesional que, normalmente, será el que tenga una titulación más cercana al tipo de construcción de que se trate.

En este sentido, también habrá que solucionar algunos problemas de tipo práctico causados por el entorno legal actual (como pueden ser los conflictos causados por la Ley de Ordenación de la Edificación y que, a veces, son de difícil solución).

### Mano de obra para la construcción

En este aspecto se ha pasado del oficio aprendido durante años al entrenamiento corto para poner en obra sistemas industrializados sencillos y cómodos de ejecutar ("del mono azul al mono blanco"). La posible evolución a futuro puede incluir aspectos (entre otros) como una mayor formación en general, pero, sobre todo, en aspectos de seguridad y salud en el trabajo, como medio de combatir el actual problema de exceso de accidentes laborales en este sector.

### Aspectos energéticos

Las fuentes de energía (CEHOPU, 1996; Cossons, 1987; Derry y Williams, 1993; Kirby et al., 1990; Rubio y Zárte, 1995) han tenido una cierta influencia en las construcciones industriales, fundamentalmente en sus inicios. En la época pre-industrial las fuentes de energía condicionaban la localización del centro de producción y la tecnología de transmisión de la energía (con ejes, engranajes y correas) condicionaba la distribución en planta interior; éste es el caso de los molinos hidráulicos convencionales y de los molinos de mareas. No obstante, con el molino de viento se resolvió el primero de estos problemas. En todo caso, el molino de viento no aportaba cantidades de energía suficientes como para abastecer a complejos importantes, ni con la continuidad adecuada.

En tiempos de la revolución industrial, con la máquina de vapor se libera la localización de la fábrica y se consigue una fuente de energía suficiente para abastecer a grandes centros de producción. Aún así, la transmisión de la energía se sigue haciendo mediante ejes, engranajes y correas, lo que condiciona la distribución en planta interior (figura 19).



Figura 19.- Transmisión de energía desde las máquinas de vapor hasta la maquinaria de proceso por ejes, engranajes y correas en el complejo Boott Mill, Lowell, Ma, EEUU, 1821 (fuente: [http://www.bc.edu/bc\\_org/avp/cas/fnart](http://www.bc.edu/bc_org/avp/cas/fnart), Boston College, Fine Arts Department, "A Digital Archive of American Architecture, Prof. Jeffery Howe).



Figura 20.- Primeras fábricas electrificadas; fábrica de zapatos electrificada por Edison, siglo XIX (fuente: <http://americanhistory.si.edu/lighting>, Smithsonian Institution, National Museum of American History; tomado en el año 2000).

Por fin, en el siglo XIX se construyen las primeras fábricas electrificadas (figura 20), lo que libera al ingeniero de las referidas ataduras en la distribución en planta. El uso del petróleo y de los saltos de agua deja a la fábrica, a efectos de su diseño básico, casi con los mismos condicionantes que hoy en día. Por otro lado, aparecen también dos nuevos tipos de complejos industriales de producción de energía: la central hidráulica y la central térmica convencional.

Posteriormente ha habido otros avances en materia energética que no han influido tanto en el diseño de plantas industriales. Como resultado del avance de la técnica en la Segunda Guerra Mundial y de la presión social existente hasta los tiempos actuales contra la contaminación ambiental, se desarrollan, primero, las centrales nucleares de producción de energía y, más adelante, se ralentizan las nucleares y se desarrolla mucho la explotación de energías renovables. Las nucleares no influyen en el diseño del complejo industrial de producción de productos no energéticos, pero sí que suponen la aparición de un nuevo tipo de complejo industrial. Por el contrario, la explotación de energías renovables sí que puede hacerse en la propia localización de la planta industrial y como parte de la nueva instalación productiva que se construye el propietario, si bien no influye demasiado sobre el diseño básico de la misma.

Por último, tanto por la presión social como por el deseo de los propietarios industriales de reducir sus gastos energéticos, las plantas industriales generan, cada vez más, la energía que ellas mismas utilizan, incorporando instalaciones de cogeneración y trigeneración, las cuales sí que influyen bastante en el diseño de la planta o fábrica.

No parecen previsibles grandes cambios a corto y medio plazo en este campo, salvo las que puedan venir de la mano de las energías renovables y, en general, de cualquier intento de minimización e incluso anulación del impacto medioambiental.

### Tecnologías y filosofías de fabricación y su mano de obra

Las tecnologías y filosofías de fabricación y su mano de obra tienen una influencia obvia sobre las construcciones industriales. En este campo (CEHOPU, 1996; Cossons, 1987; Derry y Williams, 1993; Kirby et al., 1990; Rubio y Zárte, 1995) se ha pasado desde la utilización masiva de mano de obra de fabricación poco adecuada (incluso por su escasa edad) (figura 5), escasamente cualificada y en horarios semanales de gran extensión, hasta los sistemas avanzados de fabricación (automatización, robotización) (figura 4) y filosofías avanzadas de fabricación (producción justo a tiempo, calidad total), con mano de obra de gran cualificación que controla los procesos de producción que, incluso, puede llegar a tomar la iniciativa en la mejora de los procesos de fabricación (círculos de calidad). La evolución para el futuro en esta faceta podría incluir (entre otros aspectos) el uso de robots móviles autónomos, con consecuencias claras sobre las construcciones industriales, al margen de la previsible cada vez mayor cualificación de la mano de obra, junto con unos horarios individuales cada vez menores.

### Respeto al medio ambiente

En este aspecto (figura 21) se ha pasado de los "paisajes negros" (Rubio y Zárte, 1995) de la revolución industrial hasta la actual concienciación social en esta materia, la cada vez más exigente legislación y la concienciación de muchos empresarios en este sentido como parte esencial de su imagen de marca, y no solamente para empresas que tradicionalmente utilizan tecnologías "limpias" de proceso, sino también para otras tradicionalmente contaminantes, como es el caso de las compañías petroleras. En este campo existe una doble vertiente: el respeto al medio ambiente en la explotación de la fábrica o planta industrial y el respeto al medio ambiente a la hora de diseñar y construir las infraestructuras de la fábrica. Esta segunda vertiente es la más reciente, es la que está relacionada con la construcción sostenible, materiales

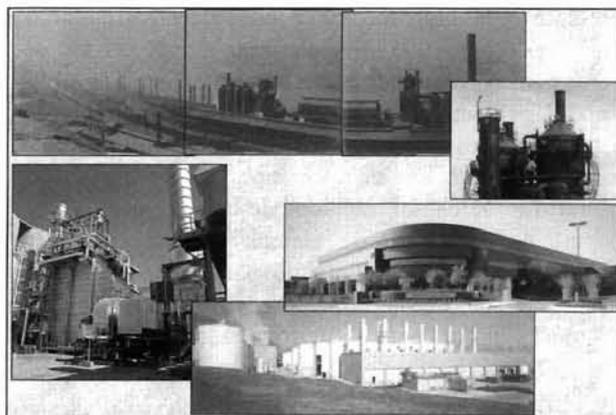


Figura 21.- Respeto al medio ambiente; de los paisajes negros a las actuales fábricas y plantas de proceso.

reciclables de construcción, ahorro energético y el concepto de construcción "verde" (*green building*) (Spiegel y Meadows, 1999). Previsiblemente, esta tendencia genérica se reforzará a futuro, si bien seguramente será en la segunda vertiente en la que veremos más avances.

### Estética

La estética tiene relación con la imagen empresarial e influye en las construcciones industriales, y también ha habido una importante evolución en este aspecto (Amery, 1995; Cejka, 1996; Gössel y Leuthäuser, 1991; Mignot, 1983; Munce, 1961; Phillips, 1993; Risebero, 1991; 1993; Slessor, 1997; Sobrino, 1996; Sommer et al., 1995). Históricamente ha habido una influencia de las tendencias estéticas arquitectónicas generales sobre lo industrial, e incluso ha habido alguna influencia de la arquitectura industrial sobre la no industrial. Por otro lado, tanto en el pasado como en el presente ha habido -y hay- fábricas y otras edificaciones relacionadas con ellas (almacenes, laboratorios, centros de investigación y desarrollo, etc.) que poseen valores estéticos unas veces deleznable y otras encomiables (figura 22). En este sentido,

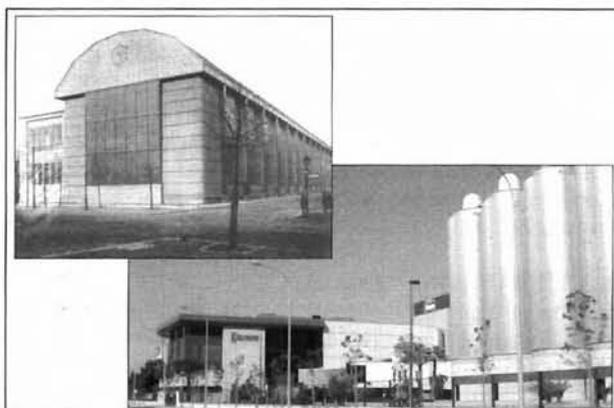


Figura 22.- Ejemplos adecuados de estética en complejos industriales; fábrica de turbinas de AEG, Peter Behrens, 1909; fábrica de cervezas Damu en Barcelona, Josep Torrella.

probablemente continuarán influyendo las tendencias generales de la arquitectura, pero la importancia de la estética aumentará en el ámbito industrial como consecuencia de la necesidad de la empresa de tener una adecuada imagen. De todos modos, no cualquier tendencia genérica arquitectónica influirá realmente sobre la arquitectura industrial (así, por ejemplo, y por mucho que el deconstructivismo de Frank Gehry haya llegado a plasmarse en un edificio de una planta industrial, se trata de una anécdota que, además, se refiere a un edificio que no es industrial en realidad -museo de la silla de la empresa Vitra-; este tipo de arquitectura implica graves problemas de ajuste a la funcionalidad del proceso con muy importantes incrementos en los costes de inversión).

### Urbanismo industrial

Desde la promiscuidad fábrica-ciudad (Heredia, 1992; Rubio y Zárate, 1995) de la revolución industrial se ha llegado hasta los actuales parques industriales, empresariales, tecnológicos y de ciencia, pasando por el concepto de polígono industrial (figura 23). El futuro en este campo puede incluir, entre otros aspectos:

- . Recuperación de enclaves y polígonos industriales y su adecuación a los estándares actuales urbanísticos y de respecto al medio ambiente.
- . Proliferación de centros de transporte, minipolígonos y parques industriales, tecnológicos, de negocios y mixtos, con cada vez menor saturación del suelo (menos superficie ocupada) y más cantidad de zonas verdes y otras zonas comunes.
- . Cada vez mayor cantidad de servicios en las zonas industriales, y tanto más cuanto mayor extensión tengan las ciudades, por la distancia de casa al trabajo.

### Otros aspectos

Otros posibles aspectos de la evolución a futuro de las construcciones industriales podrían ser:

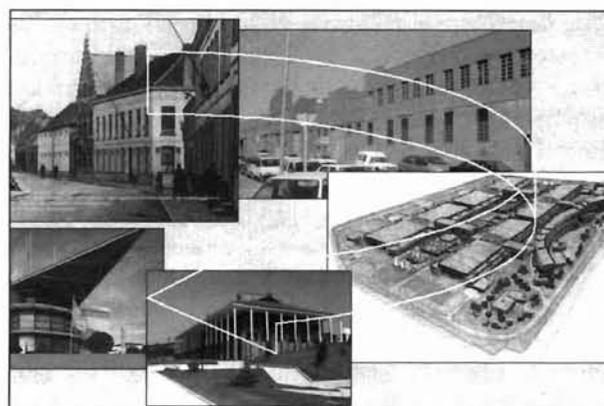


Figura 23.- De la promiscuidad fábrica-ciudad a los parques industriales, empresariales, tecnológicos y de ciencia, pasando por el polígono industrial.

. Modulaciones estructurales útiles para cualquier proceso: flexibilidad máxima para el uso de las construcciones, a la vista de los cada vez más reducidos ciclos de vida del producto a fabricar.

. Evitar una rigidez excesiva (en general en la concepción de la planta y, en particular, en lo estructural o en las instalaciones, entre otros aspectos) propiciada por una adaptación simplista de las necesidades funcionales del proceso junto con un criterio de mínima inversión.

. Recuperación de construcciones industriales de valor histórico.

. A largo o muy largo plazo la influencia de la creciente saturación urbana sobre las soluciones para los complejos industriales podrían llevar a:

- Posibles localizaciones en islas artificiales, en el caso de poblaciones en zonas costeras, en configuraciones similares a la concebida para el aeropuerto de Kansai (Japón).

- O a edificios industriales en altura (cosa que ya existe, para industria ligera y para almacenamiento) o, incluso, gran altura (rascacielos).

. Incremento de la habitabilidad, confort, aislamiento térmico y acústico y seguridad de las construcciones industriales.

### Conclusiones y futuros desarrollos

A lo largo del presente artículo se ha realizado un análisis preliminar de la evolución histórica de los principales aspectos de la construcción y arquitectura industrial, así como de las posibles líneas que podría seguir la evolución a futuro de cada uno de dichos aspectos. La posible evolución a futuro parece que será más importante (rápida y relevante) en aspectos tales como las herramientas de diseño (sobre todo en lo que respecta a la visualización dinámica en 3D); materiales de construcción; tecnología de los procesos constructivos (y tanto más cuanto se llegue a tratar de construir complejos industriales fuera del planeta); prefabricación e industrialización y organización y dirección del proyecto. Sin embargo, no se debe despreciar el potencial desarrollo en el futuro de aspectos como métodos de cálculo y dimensionamiento estructural y sus normativas; tipologías estructurales; sistemas constructivos no estructurales; tecnologías y filosofías de fabricación; o respeto al medio ambiente. Otros aspectos del desarrollo futuro de las construcciones industriales que han sido analizados en este artículo han sido los relativos al propio desarrollo industrial, a la mano de obra para la construcción, a los aspectos energéticos de las plantas industriales, a la estética, al urbanismo industrial y a otros aspectos como la seguridad, la recuperación de construcciones industriales históricas, o la localización y emplazamiento, entre otros.

A partir de ahora el equipo de trabajo se propone, entre otras cosas, ampliar la base de datos documentales existente de textos e imágenes sobre la evolución histórica y el

presente de las construcciones industriales, estructurada según los campos que se han definido en este artículo, así como con las líneas que regirán en este campo en el futuro; al ser un tema tan multidisciplinar, entrevistar a profesionales y académicos de reconocido prestigio, expertos en cada uno de los campos antes mencionados (desarrollo industrial, métodos de cálculo, etc.); visitar complejos industriales de relevancia y entrevistar a los responsables de dichos complejos para tener una visión de las necesidades que el propietario tiene hoy por hoy y de las que vislumbra para el futuro; con todo ello, ratificar, corregir o ampliar las conclusiones en cuanto al futuro de la construcción y arquitectura industrial que aquí se han vertido y realizar diversas publicaciones, incluyendo una página web que contenga toda la información generada, de manera que sirvan para orientar a los responsables de la definición de planes de estudios de ingeniería industrial en la parte correspondiente al diseño y construcción de plantas industriales.

### Bibliografía

- (1) AEIPRO (2001), "Bases para la competencia en dirección de proyectos (IPMA Spanish National Competence Baseline) V. 2.0", Asociación Española de Ingeniería de Proyectos (AEIPRO), C/ María de Luna 3, 50053 Zaragoza, España.
- (2) Alarcón, E., Alonso, E., Castillo, E., Elices, M., Millán, G., Ortiz, M., Rui-Wamba, J., Thürlimann, Torroja, J., Torroja, J.A., Villar, J.M. (2000), "De la construcción a la ciencia. Ayer y hoy de Eduardo Torroja", Academia de Ingeniería, Madrid, España (ISBN 84-923406-6-5).
- (3) Allen, E., Iano, J. (1990), "Fundamentals of building construction. Materials and methods", Wiley, New York, USA (ISBN 0-471-50911-6).
- (4) Amery, C. (1995), "Architecture, industry and innovation", Phaidon, London, UK (ISBN 0-7148-2923-4).
- (5) Anónimo (1969), "Valladolid en Castilla", Excm. Diputación de Valladolid, España.
- (6) Blockley, D., Godfrey, P. (2000), "Doing it differently. Systems for rethinking construction", Thomas Telford, London, UK (ISBN 0-7277-2748-6).
- (7) Burón, M., Fernández-Ordóñez, D. (1997), "Evolución de la prefabricación para la edificación en España. Medio siglo de experiencia.", Informes de la Construcción Vol. 48, N° 448, marzo/abril de 1997.
- (8) CEHOPU (1996), "Betancourt, los inicios de la ingeniería moderna en Europa", Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo (CEHOPU), Madrid, España (ISBN 84-380-0112-2).
- (9) Cejka, J. (1996), "Tendencias de la arquitectura contemporánea", Gustavo Gili, México (ISBN 968-887-281-4).
- (10) Cossons, N. (1987), "The BP book of Industrial Archaeology", David & Charles, Vermont, EE UU (ISBN 0-7153-8931-9).

- (11) Cross, H., Morgan, N.D. (1953), "Estructuras continuas de hormigón armado", Editorial Dossat, Madrid, España.
- (12) del Caño, A., de la Cruz, M.P. (1993), "Del dibujo asistido por ordenador a la construcción integrada por ordenador: una propuesta conceptual", diciembre de 1993, pp. 30-33.
- (13) del Caño, A., de la Cruz, M.P. (1998), "The past, present and future of project risk management", International Journal of Project and Business Risk Management, vol. 2 issue 4 winter 1998, pp. 361-387.
- (14) Derry, T.K., Williams, T.I. (1993), "A short history of technology", Dover Publications Inc., New York, EE UU (ISBN 0-486-27472-1).
- (15) Díaz, J.C. (1993), "La ingeniería en los edificios de alta tecnología", Celca, Madrid, España (ISBN 84-604-8260).
- (16) Domínguez, M., Conde, J. Borrego, J.L., Espinosa, M.M., Fadón, F., Pose, J., Ochoa, J.M., Sanz, J.M., de la Cruz, M.P., del Caño, A., Arenas, J.M. (1995), "Diseño y dibujo asistido por computador", UNED, Madrid, España (ISBN 84-362-3282-8).
- (17) Fernández-Ordóñez, J.A. (1990), "El pensamiento estético de los ingenieros. Funcionalidad y belleza.", Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, Madrid, España.
- (18) Gössel, P., Leuthäuser, G. (1991), "Arquitectura del siglo XX", Benedikt Taschen, Colonia, Alemania (ISBN 3-8228-0234-4).
- (19) Harris, J.S. (1995), "Ground freezing in practice", Thomas Telford, Londres, UK.
- (20) Heredia, R. (1992), "Desarrollo histórico de la arquitectura industrial", Publicaciones ETSII de la UPM, Madrid, España.
- (21) Illingworth, J.R. (2000), "Construction methods and planning", E & FN Spon, London, UK (ISBN 0-419-24980-X).
- (22) ISARC (1999), "Proceedings of the 16th IAARC / IFAC / IEEE International Symposium on Automation and Robotics in Construction", Madrid, España, septiembre 22-24, 1999.
- (23) ITEA (2000), "ESDEP: Programa Europeo de Formación en Cálculo y Diseño de la Construcción en Acero (CD-ROM)", Instituto Técnico de la Estructura en Acero (ITEA), Guipúzcoa, España.
- (24) Johnsson, S.W., Chua, K.M., Galloway, R.G., Richter, P.J. (Editors) (2000), "Space 2000. Proceedings of the Seventh International Conference and Exposition on Engineering, Construction, Operations and Business in Space", Albuquerque, New Mexico, EE UU, 27 de febrero a 2 de marzo, 2000, ASCE (ISBN 0-7844-0479-8).
- (25) Kirby, R.S., Withington, S., Darling, A.B., Kilgour, F. G. (1990), "Engineering in History", Dover Publications Inc., New York, EE UU (ISBN 0-486-26412-2).
- (26) Klein, N. (2001), "No logo. El poder de las marcas", Ed. Paidós, Barcelona, España (ISBN 84-493-1074-1).
- (27) MacDonald, A. (1994); "Structure & architecture", Butterworth Architecture, UK.
- (28) Merritt, F.S., Ricketts, J.T. (1997), "Manual integral para diseño y construcción", McGraw Hill, Santa Fe de Bogotá, Colombia (ISBN 958-600-668-9).
- (29) Mignot, C. (1983), "Architecture of the 19th Century", Evergreen, Köln, Germany (ISBN 3-8228-9032-4).
- (30) Miravete, A. (1995), "Los nuevos materiales en la construcción", Antonio Miravete, Zaragoza, España.
- (31) Morris (1994), "The management of projects", Thomas Telford, London, UK (ISBN 0-7277-1693-X).
- (32) Munce, J.F. (1961), "Industrial architecture", Iliffe Books Ltd, London, UK.
- (33) Phillips, A. (1993), "Arquitectura industrial", Gustavo Gili, Barcelona, España (ISBN 84-252-1613-3).
- (34) Project Management Institute (2000), "A guide to the project management body of knowledge (PMBok guide)". Project Management Institute, Newtown Square, Pennsylvania, EE UU.
- (35) Racionero, L. (2000), "El progreso decadente", Espasa, Madrid, España, ISBN 84-239-6646-1).
- (36) Risebero, B. (1991), "Historia dibujada de la arquitectura", Celeste Ediciones, Madrid, España (ISBN 84-87553-16-8).
- (37) Risebero, B. (1995), "Historia dibujada de la arquitectura. Últimas tendencias", Celeste Ediciones, Madrid, España (ISBN 84-8211-009-8).
- (38) Rubio, M.T., Zárata, A. (1995), "Espacios industriales", UNED, Madrid, España, ISBN 84-362-3215-1.
- (39) Slessor, C. (1997), "Arquitectura high-tech y sostenibilidad", Gustavo Gili, Barcelona, España (ISBN 84-2521726-1).
- (40) Sobrino, J. (1996), "Arquitectura industrial en España, 1830-1990", Cátedra, Madrid, España (ISBN 84-376-1441-4).
- (41) Sommer, D., Weisser, L., Holletschek, B. (1995), "Architecture for the work environment", Birkhäuser, Basel, Switzerland (ISBN 0-8176-5162-4).
- (42) Spiegel, R., Meadows, D. (1999), "Green building materials: a guide to product selection and specification", Wiley, New York, EEUU.
- (43) Stone, W.C. (Editor) (2000), "Robotics 2000. Proceedings of the Fourth International Conference and Exposition on Robotics for Challenging Situations and Environments", Albuquerque, New Mexico, EE UU, 27 de febrero a 2 de marzo, 2000, ASCE (ISBN 0-7844-0476-3).
- (44) Wagter, H. (1992), "Computer integrated construction", Elsevier, Amsterdam, The Netherlands (ISBN 0-444-89262-1).
- (45) Warszawski, A. (1999), "Industrialized and automated building systems", E & FN Spon, London, UK (ISBN 0-419-20620-5).