

Materiales y sistemas constructivos

Hugo Corres Peiretti,
Javier León Gonzalez,
José Romo Martín,
Luis M. Viartola Laborda



1. INTRODUCCIÓN

Resulta más que previsible que el desarrollo de la ingeniería estructural en el futuro próximo esté vinculado a la evolución de los materiales tradicionales, a la aparición de otros nuevos y al avance de los medios de construcción. En todos estos ámbitos se ha experimentado una espectacular transformación en los últimos lustros y, con toda seguridad, se registrarán importantes avances en el futuro próximo.

La reinterpretación de sistemas estructurales, tipologías y métodos constructivos tradicionales, utilizando eficientemente las nuevas posibilidades que aportan los nuevos materiales y procesos, dará como resultado un aún inimaginable elenco de posibilidades para las estructuras del próximo futuro.

En este artículo se presentan las perspectivas que ofrece ese avance en el ámbito de los materiales estructurales y de los sistemas constructivos.

2. MATERIALES ESTRUCTURALES TRADICIONALES

Los materiales estructurales tradicionalmente empleados han evolucionado de manera extraordinaria. Basta echar la vista atrás para constatar la mejora de la calidad mecánica y de las prestaciones de los hormigones, los aceros (estructurales y para armaduras pasivas y activas), otros materiales metálicos, maderas, cerámicas y bloques de hormigón, etc. Esta muy positiva evolución ha sido aceptada por la comunidad técnica, hasta tal punto, que la nueva

Materiales y Sistemas constructivos

normativa los ha incorporado al club de los materiales consagrados, aptos para el uso con garantías. Naturalmente, todo eso ha sido posible a partir de la experiencia de uso, impuesta por la praxis y por el mercado, y de la investigación teórica y aplicada.

2.1 Hormigón

El hormigón, cuyo uso como material estructural ya atisbaron sagazmente sus inventores y quienes lo desarrollaron posteriormente, y aquéllos que vieron en él las muchas posibilidades que podía ofrecer, ha evolucionado en sus características —de todo tipo— de forma muy significativa.

Se han desarrollado hormigones de altas prestaciones, que constituyen una posibilidad tecnológica al alcance de cualquier proyecto. En pocos años, la resistencia se ha multiplicado por 4 y se han mejorado muchas otras cualidades, especialmente las relativas a la durabilidad (compacidad, impermeabilidad, capacidad de proteger las armaduras).

El hormigón ligero, ha permitido estirar el rango de luces altas usándolo para reducir el peso propio de forma considerable.

La apariencia de los hormigones —asociada comúnmente a algo frío, aburrido, poco acogedor— ha sido motivo de desarrollos ya consolidados y muy interesantes, aunque también se han hecho propuestas más estrambóticas?. Hormigones pigmentados o tratados superficialmente e incluso el desarrollo de hormigones traslucidos, utilizando fibras de vidrio adecuadamente orientadas, son hoy una posibilidad que presenta el mercado y que resultaban inimaginables hace sólo unos pocos años.



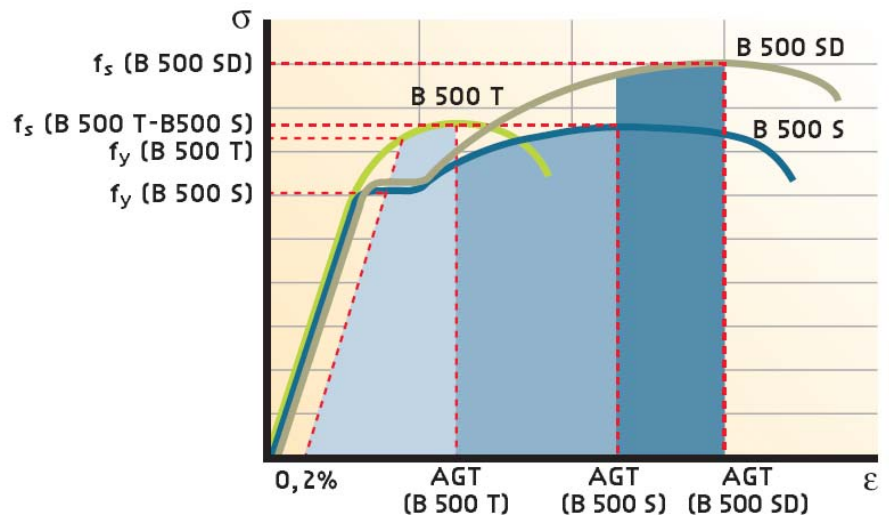
Hormigón autocompactable recién vertido

Materiales y Sistemas constructivos

Desde el punto de vista constructivo el desarrollo de los hormigones autocompactables ha abierto un atractivo abanico de posibilidades que hace posible, al mejorar tanto el precio como la calidad del producto terminado (piezas sin coqueras, compactas, durables), el proyecto y la construcción de elementos que no eran concebibles antes de su aparición.

2.2 Acero de armar

No es excesivamente conocido el espectacular desarrollo que la industria siderúrgica ha imprimido a la fabricación de barras para el armado de las piezas de hormigón estructural. En los últimos tres lustros, aproximadamente, se ha pasado de la coexistencia de barras de acero de dureza natural y barras de aceros deformados en frío, conjuntamente con aceros lisos de capacidad mecánica mitad de los primeros — que o no eran soldables, o requerían de precauciones especiales—, a aceros universalmente soldables y con ductilidades muy mejoradas, especialmente con relación a los aceros deformados en frío. Viene a cuento recordar que la ductilidad estructural, propiedad más que deseable, depende a su vez, aunque no de manera única, de la ductilidad de las armaduras. En ese sentido, se han dado pasos de gigante que las estructuras, a su manera, agradecen encantadas.



2.3 Aceros de ductilidad mejorada (celsa)

También han mejorado extraordinariamente las calidades y posibilidades de la ferralla elaborada industrialmente, lo que se ha traducido en una mayor calidad, homogeneidad y trazabilidad general, así como en sus detalles (radios de doblado, longitudes de anclaje, solapo, etc.) y en sus

Materiales y Sistemas constructivos

rendimientos. Como en otras facetas de la vida, la felicidad nunca es completa, y aún se detectan errores y atavismos en ciertas prácticas de armado, lo que tiene más que ver con la pericia de los proyectistas que con quienes elaboran la ferralla, ciertamente, pero viene a cuento de la necesidad de mejorar en ese difícil “arte de armar”.

En connivencia con los hormigones, también han mejorado las condiciones de protección de las barras frente a la corrosión. En ello ha tenido que ver la imposición —que ahora resulta obvia— de requisitos explícitos para asegurar los recubrimientos (los separadores). Además, desde hace más de quince años existen en el mercado técnicas de protección de naturaleza bien diversa (recubrimientos epoxídicos, protección catódica, galvanización) que ofrecen esperanzadoras posibilidades, si bien es preciso aún superar ciertos escollos tecnológicos, a menudo relacionados más con la materialización en obra que con las propiedades intrínsecas de esos sistemas.

Los aceros inoxidable, aunque se han acercado notablemente a los aceros convencionales (mejorados como se acaba de indicar) en cuando a precio (se ha dividido por 2, aproximadamente, el precio en los últimos seis años, están aún lejos de competir en aplicación masiva, aunque su empleo localizado, con reducido impacto económico en el global de la obra, es de enorme interés.

2.4 Acero estructural

El acero estructural es otro de los materiales de construcción tradicionales que está en plena transformación. Los nuevos sistemas de fabricación están proporcionando una nueva generación de aceros estructurales que están mejorando las propiedades de resistencia, tenacidad, soldabilidad, deformación en frío y resistencia a la corrosión que los aceros tradicionales.

La aparición en los últimos 15 años de este tipo de aceros, es fruto del desarrollo en la tecnología de fabricación, tanto en lo relativo a la metalurgia como en los procesos de laminado y en los tratamientos térmicos, en especial en lo relativo a los procesos de control termo-mecánicos.

Materiales y Sistemas constructivos



Perfiles armados especiales. Edificio sede de la EMT en Madrid

El proceso de laminado termomecánico comenzó su desarrollo en los años 70 para su aplicación en el campo de la construcción de tuberías, difundiéndose rápidamente su empleo en los campos de la industria naval y en la construcción de las plataformas de extracción “offshore”.

El proceso de laminación termomecánica, es un procedimiento en el que la deformación final se realiza en un rango de temperaturas, que conduce a un material con unas propiedades que no pueden alcanzarse sólo mediante un tratamiento térmico.

El resultado del proceso es un acero con una alta resistencia y tenacidad y que al mismo tiempo presenta una aleación mínima lo que redundará en una mejor soldabilidad.

Los aceros termomecánicos comerciales presentan una gama de calidades con un límite elástico que varía entre 420 MPa y 960 MPa, siendo el rango habitual de empleo el situado entre los 420 MPa y los 690 MPa.

Los aceros de altas prestaciones pueden ser soldados a elementos de acero convencional. En especial los aceros termomecánicos, por ejemplo el S460M tienen un bajo contenido de carbono, del todo equivalente al de un acero ordinario.

Los aceros termomecánicos tienen una menor necesidad de precalentamiento para la realización de soldaduras, lo que permite trabajar incluso con espesores mayores que los aceros convencionales sin precalentamiento, lo que permite reducir el riesgo y el coste de las soldaduras.

La mayor resistencia de este tipo de aceros, permite la construcción de estructuras más ligeras, lo que reduce los tiempos de fabricación, los volúmenes de soldadura, y los costes de manipulación, transporte y montaje.

Materiales y Sistemas constructivos

El acero de altas prestaciones resulta por lo tanto un material especialmente competitivo en estructuras puentes de luces medias y altas y todas aquellas obras en las que el peso propio resulta la acción preponderante.

2.5 Piedra y ladrillo

En el ámbito de la ingeniería estructural, las fábricas de piedra y ladrillo han parecido asociadas al pasado y han quedado relegadas a un papel muy secundario. Quizás convenga revisar ese planteamiento. Por una parte, la necesidad de rehabilitar un inmenso patrimonio de construcciones de piedra y ladrillo, ha puesto de manifiesto la necesidad de re-estudiar sus propiedades mecánicas, de durabilidad, de auscultación, etc., lo que ha situado esta actividad en primera línea de la ingeniería teórica y experimental, en el ámbito de los materiales y de las estructuras.

Por otra parte, no deben descuidarse las nuevas posibilidades que dan los materiales cerámicos más recientes, tanto desde el punto de vista mecánico y constructivo, como desde el punto de vista de su expresión arquitectónica, en su sentido más etimológico.

3. MATERIALES ESTRUCTURALES NUEVOS: LOS MATERIALES COMPUESTOS

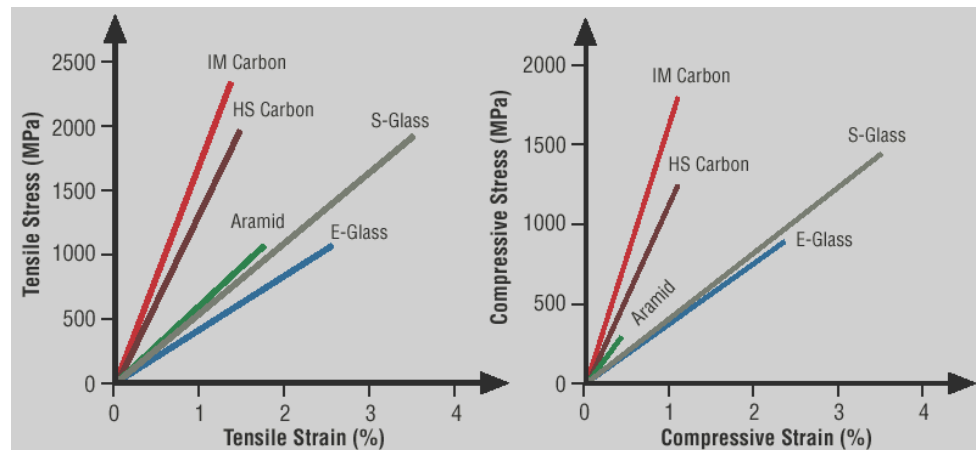
De una forma amplia, se denominan materiales compuestos a los formados por una matriz que puede ser metálica, cerámica, de carbón, inorgánica u orgánica, con fibras de refuerzo. Dentro de esta gama de posibilidades, se denominan habitualmente “composites” o materiales compuestos a aquellos materiales formados por una matriz termoestable epoxídica, de poliéster o fenólica y unos refuerzos de fibra: de boro, carbono, aramida o de vidrio.

Este tipo de materiales son usados con profusión en los campos de la aeronáutica, la náutica y la automoción, en los que se ha desarrollado su tecnología.

En la actualidad los materiales compuestos se empiezan a usar en ingeniería civil, en aquellas estructuras en las que la disminución del peso propio es vital para la viabilidad de la estructura, ya que estos materiales son los que presentan una mayor relación resistencia/peso.

Materiales y Sistemas constructivos

Ya hemos asistido a la utilización de materiales compuestos en la construcción de puentes dentro de cuatro ámbitos: el uso como fibras, armaduras pasivas o activas del hormigón; el uso en la reparación de estructuras existentes; el uso combinado con otros materiales para dar origen a las denominadas estructuras híbridas; y por último, su uso para construir nuevas estructuras íntegramente de materiales compuestos.



Diagramas tensión-deformación de distintos materiales compuestos

En otras situaciones, tales como aquellas en las que existen ataques químicos o la estructura tiene que ser dieléctrica, los materiales compuestos son altamente competitivos.

Existen gran número de sistemas de fabricación, así como tipologías de las fibras de refuerzo, que abren el abanico de soluciones estructurales posibles.

Otra ventaja de este tipo de materiales es la posibilidad de disponer las fibras de refuerzo con la cantidad y orientación necesaria en los puntos en que son realmente efectivas en función de las solicitaciones existentes.

La aparición de métodos industriales de producción tales como la pultrusión ha permitido la fabricación en serie de perfiles comerciales con las más variadas tipologías con un precio más competitivo.

En los últimos años se ha producido una reducción importante en los costes de estos materiales como consecuencia de la mayor demanda de los mismos. Esto ha permitido la aparición de realizaciones en el ámbito de la obra civil (pasarelas y algunos puentes de luz estricta) o en cubiertas en el campo de la arquitectura. En general, el

Materiales y Sistemas constructivos

planteamiento más eficaz no es tratar de realizar completamente la estructura en estos materiales sino buscar una combinación óptima de los materiales a usar en cada elemento estructural de forma que se obtenga el máximo rendimiento de cada uno.



Cubierta en material compuesto: Delfinario de Tenerife

Tal y como ha ocurrido con la irrupción de un nuevo material, es de esperar en el futuro el desarrollo de nuevos elementos estructurales con formas adaptadas a estos materiales que tal vez conduzcan a la aparición de nuevas tipologías estructurales.

3.1 *Materiales para el refuerzo y reparación*

A la necesidad de construir se une, de manera creciente, la necesidad de mantener y rehabilitar, en sintonía lógica y racional con “lo sostenible”. Desde este punto de vista, los nuevos materiales ofrecen un sin fin de posibilidades que los ingenieros estructurales deben conocer. Se trata, además, de materias que apenas se enseñan en nuestras Escuelas y que se están introduciendo en el mercado mucho más deprisa de lo que el sistema normalizador puede y debe digerir.

Así, se pueden encontrar ya ejemplos de interés del enorme potencial que morteros y micro-hormigones, o las fibras y bandas de carbono están brindando a las actuaciones en materia de reparación y refuerzo. Desde este punto de vista, es importante hacer una reflexión acerca de la actitud intelectual del ingeniero ante este tipo de problemas. En primer lugar, el ingeniero debe entender y respetar la configuración estructural inicial, que casi siempre ha demostrado su eficacia, aunque sólo sea por el hecho de haber perdurado. En segundo lugar, debe calibrar qué amenazas se ciernen sobre la estructura (deterioros, nuevos usos, nuevas exigencias funcionales), con el fin de identificar los estados límite correspondientes (no siempre coincidentes con los tradicionales). Finalmente, debe pensar en el proceso de ejecución de manera mucho más prolija que

Materiales y Sistemas constructivos

en estructuras normales. Precisamente es en este último aspecto donde los nuevos materiales ofrecen enormes posibilidades al ingeniero, que las debe explotar teniendo en cuenta también las limitaciones que también tienen estos materiales.

4. LA IMPORTANCIA DEL PROCESO

No cabe duda que los procedimientos constructivos conocidos, en continuo desarrollo y actualización, y la innovación en los métodos de ejecución para el desafío de nuevos retos, representan en muchos casos la vanguardia en la evolución de los puentes y edificios. Así, la incapacidad de materializar una estructura para salvar un determinado obstáculo viene determinada en muchos casos por la falta de un procedimiento constructivo específico y adecuado, y no por la falta de capacidad de análisis o de los materiales necesarios. Este hecho, que ha sido una constante en la historia de la construcción, se presenta también en la actualidad.

Para poder proyectar una estructura es necesario conocer cómo se va a construir. La importancia del procedimiento de construcción en la concepción y dimensionamiento de una estructura es determinante. Es decir, la cantidad de materiales resistentes a aplicar en una estructura viene determinada por el proceso que se adopte para su construcción, o lo que es lo mismo, por la cantidad de mano de obra y medios auxiliares que se utilicen para colocar los materiales en su posición definitiva. Esto abre un amplio abanico de posibilidades. De hecho, la forma en que se ha abordado este binomio materiales-proceso a lo largo de la historia ha variado en la medida que se ha avanzado en el nivel de desarrollo de la sociedad. Así, por ejemplo, en épocas anteriores donde el coste de la mano de obra estaba por debajo del coste de los materiales, se buscaba una economía de éstos a costa de un dimensionamiento estricto de la estructura, que necesita de procesos con mayor cantidad de mano de obra. Esta situación, que aún perdura en sociedades poco desarrolladas, se ha invertido hace tiempo en nuestro país y en los países de nuestro entorno. Así, y desde un punto de vista de la adecuada gestión de los recursos que se asignan a una estructura, buscando que sean los mínimos necesarios y que sean usados con eficacia, los recursos asignados al proceso adquieren una mayor

Materiales y Sistemas constructivos

importancia, tendencia que se acentúa cuanto mayor es la importancia de una estructura.

Por ello, son posibles situaciones en que una determinada estructura, una vez finalizada, resulte más cara que otra si se valora de acuerdo, únicamente, al coste de adquisición de sus materiales constitutivos y, a pesar de ello, resultar la solución más ventajosa desde el punto de vista de la aplicación total de recursos. Esto se hace posible si se ha producido una reducción de medios auxiliares, o la utilización de unos menos costosos, o si se ha disminuido el plazo de ejecución con lo que el coste total de la estructura puede verse beneficiado por la reducción de costes asociados al tiempo. El tiempo es, por tanto, otro factor asociado al proceso que adquiere una importancia destacada.

Queda por tanto patente la importancia, cada vez mayor, del proceso constructivo en la concepción y viabilidad de una obra. Tal es así que, por ejemplo, hay formas de clasificar los puentes donde éstos se conocen por el sistema empleado en su construcción. Así, hablamos de puentes de voladizos sucesivos, puentes empujados, o puentes cimbrados para diferenciar entre sí puentes que pueden responder a un mismo tipo estructural de viga continua.

5. LA EVOLUCIÓN EXPERIMENTADA POR LOS PROCESOS CONSTRUCTIVOS

A lo largo de la historia de la construcción, y sobre todo en las últimas décadas, se ha trabajado constantemente en la mejora de los procedimientos existentes, en su adecuación a las técnicas y medios actuales, en su racionalización e industrialización, con el objetivo de satisfacer las crecientes demandas sociales y acercarnos a procesos más seguros, respetuosos con el medio ambiente, competitivos en economía y plazo y garantes de la calidad final de la obra.

Los factores que han ayudado a esta evolución han sido, fundamentalmente, los siguientes:

- El desarrollo y la mejora en las prestaciones de los medios auxiliares, cada vez más potentes y versátiles. Estos equipos de elevación y posicionamiento de grandes cargas, han permitido la evolución de soluciones modulares de elementos prefabricados: vigas, losas, dovelas, vanos de puente completos, etc. También en el caso de estructuras construidas in situ,

Materiales y Sistemas constructivos

la mejora en su proceso de construcción ha estado vinculada a la evolución en los medios auxiliares, en este caso los sistemas de cimbrado con la generalización en el uso de potentes cimbras autoportantes y autolanzables.

- La transferencia horizontal de tecnología desde otros sectores industriales. En este caso se situarían, por ejemplo, los dispositivos para el movimiento de grandes módulos estructurales aprovechando la capacidad resistente de los mismos, cuyo origen se sitúa en las necesidades de sectores industriales para el manejo de grandes cargas. Entre estos dispositivos se pueden destacar: sistemas de reptación o elevación por medio de gatos, mesas de giro, pórticos grúa, elementos flotantes, vehículos de carga, etc. Otro ejemplo sería la utilización de materiales compuestos desarrollados desde la industria aeronáutica.



Procedimiento de empuje puente sobre el río Sil

- Adecuación al nivel tecnológico actual de sistemas de construcción clásicos. Un ejemplo se puede encontrar en los bípodes y mástiles atirantados que se usaban en el origen de los puentes de vigas para el lanzamiento de las mismas, cuya traducción a los medios actuales sirve para el posicionamiento de puentes completos incluso de grandes dimensiones.



Puente de Lanjarón

Materiales y Sistemas constructivos

- Evolución de los dispositivos de apoyo, deslizamiento, amortiguamiento, bloqueo, etc. Todas las mejoras en estos campos han permitido el desarrollo de los sistemas de empuje y lanzamiento de estructuras, y la estabilización de las fases intermedias. Este es un ejemplo de las grandes aportaciones de la industria auxiliar de la construcción a la mejora de los procesos.
- La capacidad de análisis, herramientas de cálculo, el conocimiento del comportamiento de los materiales, de las interfaces entre los distintos materiales, y los sistemas de conexión, ha permitido una alternancia enriquecedora en las tipologías estructurales, que también comparten los distintos procesos de construcción.
- La mejora en los dispositivos de control y la automatización de procesos. La precisión alcanzada por los aparatos de medida, la monitorización de la estructura las fases constructivas, y la disponibilidad inmediata y centralizada de toda la información que suministran, permite acometer complejas operaciones de montaje con un control pleno sobre el proceso, y con garantía de éxito.

6. NUEVOS MATERIALES PARA MEJORAR LOS PROCESOS

Inciendo una vez más en la íntima relación que existe entre materiales y procesos, a continuación se exponen algunos casos en los que la evolución en los materiales tradicionales o la aparición de otros nuevos, aporta significativas ventajas al proceso constructivo, lo que justifica su utilización por encima incluso de las mejores cualidades resistentes que se han expuesto anteriormente.

Las principales prestaciones que el hormigón puede aportar al proceso constructivo son aquéllas ligadas a la evolución de su resistencia en tiempos cortos, y a conseguir una mayor ligereza y facilidad de puesta en obra. Por ello, más que un hormigón de alta resistencia, resulta ventajoso el uso de hormigones de resistencias iniciales altas, pues permite acortar los ciclos de construcción al poder tesar, desencofrar y descimbrar en plazos más cortos. Una cualidad del hormigón desde el punto de vista del proceso no es tanto su resistencia característica a los 28 días, sino la que necesita en función del procedimiento de construcción.

Materiales y Sistemas constructivos

En el caso del hormigón ligero su ventaja va asociada a la menor necesidad de capacidad en los medios auxiliares para su puesta en obra, además de aquellas derivadas de su mejor eficiencia estructural, es decir, igualdad de resistencia para menores solicitaciones de peso propio.

El hormigón autocompactable presenta las ventajas derivadas de su facilidad de puesta en obra con la consiguiente mejora en los rendimientos del proceso. Su consistencia fluida le permite rellenar todos los huecos de un molde aunque parezcan inaccesibles, y no necesita compactación interna o externa, pues se consolida por acción de su peso propio.

La aplicación a la construcción estructural de los materiales compuestos constituye otro ejemplo de transferencia horizontal de tecnología desde la industria aeronáutica y del automóvil, que ha investigado mucho sobre materiales más eficientes. Desde un punto de vista del proceso constructivo, las ventajas que aportan frente a los materiales convencionales, vienen derivadas de su excelente eficacia estructural, entendida con la relación resistencia/peso propio, que resulta aproximadamente 40 veces mejor que el acero estructural.

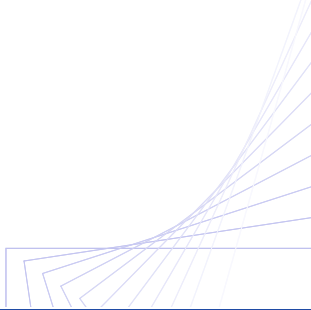
7. LOS RETOS PARA EL FUTURO

Los avances en la construcción de estructuras deben y van a continuar, al igual que ha ocurrido hasta ahora. El sector de la construcción debe afrontar los retos del futuro investigando en tecnologías, sistemas y procesos constructivos, así como en sistemas de evaluación y gestión en la construcción. Se debe asegurar que los procesos sean más seguros, que se incremente la competitividad y productividad.

El desarrollo y la innovación de los procesos de construcción debería contemplar los aspectos siguientes:

- Búsqueda de esquemas estáticos evolutivos, que sean autoportantes en etapas intermedias del proceso constructivo. Estructuras que se vayan resistiendo a sí mismas en una evolución tanto longitudinal como transversal. Se trata de encontrar un equilibrio entre un dimensionamiento de la estructura que no difiera mucho del que tendría en su estado final, intentando

Materiales y Sistemas constructivos



aplicar la mínima cantidad de medios auxiliares de construcción y mano de obra.

- Búsqueda de la máxima eficiencia de los materiales. Esto nos llevará a una proliferación cada vez mayor de estructuras mixtas en su sentido más amplio. Estructuras mixtas de distintos hormigones, de hormigón y acero, y de hormigón y/o acero con nuevos materiales compuestos, donde cada material trabaje de la forma más adecuada a su capacidad.
- Reducir la duración del proceso. Hay que continuar con la sistematización de los procesos de construcción, para introducir en la actividad constructora todas las ventajas que la industrialización de procesos ha aportado a otros sectores productivos.
- Desarrollo de nuevos procesos más seguros, y respetuosos con el medio ambiente, utilizando para ello nuevos equipos más potentes y operativos, dotados de sistemas inteligentes de control.
- Prestar una atención especial a la transferencia horizontal de tecnología desde otros sectores de la industria, como las innovaciones en sistemas cinemáticos, o nuevos materiales.
- Los objetivos deben ser ambiciosos en su planteamiento, hay que perseguir saltos cualitativos importantes, como por ejemplo el que supuso la aparición del hormigón pretensado o los puentes mixtos, aunque sin renunciar a las mejoras graduales que también han contribuido a que muchas de las estructuras que se construyen en la actualidad sean una evolución tecnológica de las que se construían hace unas décadas.

8. CONSIDERACIONES FINALES

A modo de síntesis de lo expuesto antes, puede deducirse que las transformaciones en la ingeniería estructural vendrán, de forma muy significativa, de la evolución de los materiales estructurales tradicionales y de la aparición de otros nuevos y de los procesos constructivos. Pero todo ello ha de aderezarse con grandes dosis de buen juicio y de sensibilidad ingenieril, capaz de buscar el difícil equilibrio entre lo resistente, lo constructivo, lo durable, lo funcional, lo

Materiales y Sistemas
constructivos

sostenible (lo racional), etc. En definitiva, el continuo y apasionante reto de la ingeniería estructural.

Para todo eso, la ingeniería estructural debe hacer un esfuerzo de comprensión de las nuevas posibilidades que ofrecen los materiales, los medios constructivos y de proyecto con el fin de aprovecharlas y multiplicar, con nuevas e innovadoras ideas, sus potencialidades. En definitiva, sumar a l