



Puente romano de Mérida.

José Emilio Herrero Benítez,
Dirección técnica. Ferrovial Agroman.

1. Introducción y resumen

Los materiales y sus propiedades tienen una influencia definitiva en los tipos estructurales y en los procesos disponibles para construir puentes. En este artículo se intenta analizar cuál es la tendencia en el uso de materiales para la construcción de puentes. Para ello, se expone cuál ha sido la evolución en el pasado de estos materiales y las características y razones que han liderado esos cambios.

El diccionario de la RAE define material, en una de sus acepciones, como “Cada una de las materias que se necesitan para una obra, o el conjunto de ellas”. Aquí se ha tomado también como material un conjunto de éstos trabajando en la misma sección, como el hormigón armado o pretensado.

Palabras clave: Materiales para

puentes, materiales compuestos, evolución de puentes, hormigón armado, hormigón pretensado.

2. Historia de la evolución de materiales para puentes

Los primeros materiales utilizados en la construcción de puentes fueron naturales, es decir, con poca transformación, como la madera o la piedra. Los desarrollos tecnológicos permitieron el uso de materiales transformados como el hierro y el hormigón. Combinando las cualidades de unos y otros aparecieron materiales que mezclan varios materiales básicos como es el hormigón armado y el pretensado.

2.1. La madera

Los puentes más primitivos se construyeron de madera, y, probablemente, un tronco partido sobre un cauce es el ejemplo más simple. Según se fueron desarrollando las técnicas de trabajo de la madera y de sus

uniones, se desarrollaron tipos estructurales más complejos. La escasa durabilidad de este material obligó a sustituirlo por piedra cuando las sociedades quisieron que sus obras perdurasen. La construcción de arcos de piedra no hace que dejen de construirse puentes de madera hasta épocas recientes; un ejemplo tardío son los puentes para el ferrocarril hacia el Pacífico en EE.UU. construidos a finales del siglo XIX.

2.2. La piedra

También, la simple colocación de una piedra sobre un río pudo servir de puente primitivo. La acumulación de piedras formando voladizos desde ambas orillas (falso arco) pudo ser un antecesor del arco, que es donde la piedra da su máximo rendimiento debido a su buena capacidad para resistir compresiones.

2.3. El hierro

La aparición del hierro supone una verdadera revolución en la construcción de puentes, convirtiéndose en

un símbolo del desarrollo industrial. Los diferentes materiales que se usan, hierro fundido, forjado y acero, tienen en común su buen comportamiento a tracción en comparación con la piedra. Sin embargo, los primeros diseños de puentes con este material intentan imitar los mismos arcos de piedra. *Este error se repetirá en el resto del cambio de materiales.*

La aparición de un nuevo material supone la necesidad de tener que resolver un montón de cuestiones tecnológicas y detalles como son las uniones, los apoyos, la aplicación de cargas localizadas, y la producción de elementos estructurales con mayor capacidad. *Sólo cuando se han resuelto todos esos detalles se puede decir que la tecnología de un material está madura.*

2.3.1. Fundición

En 1779 se construye el primer puente de hierro fundido, el Coalbrookdale sobre el Severn. El triun-



Coalbrookdale bridge.

Se siguen usando los arcos como tipo estructural con barras largas fundidas o con dovelas. Para las uniones, se usan algunos de los detalles utilizados para la madera.

2.3.2. Hierro forjado

Con el desarrollo industrial aparece el hierro forjado, con característi-

tipo estructural construyéndose una gran celosía, con sección cajón.

2.3.3. Acero

A finales del XIX se empiezan a construir los primeros puentes de acero. Unos años antes el convertidor Bessemer y, posteriormente, el sistema Siemens-Martin hizo que el



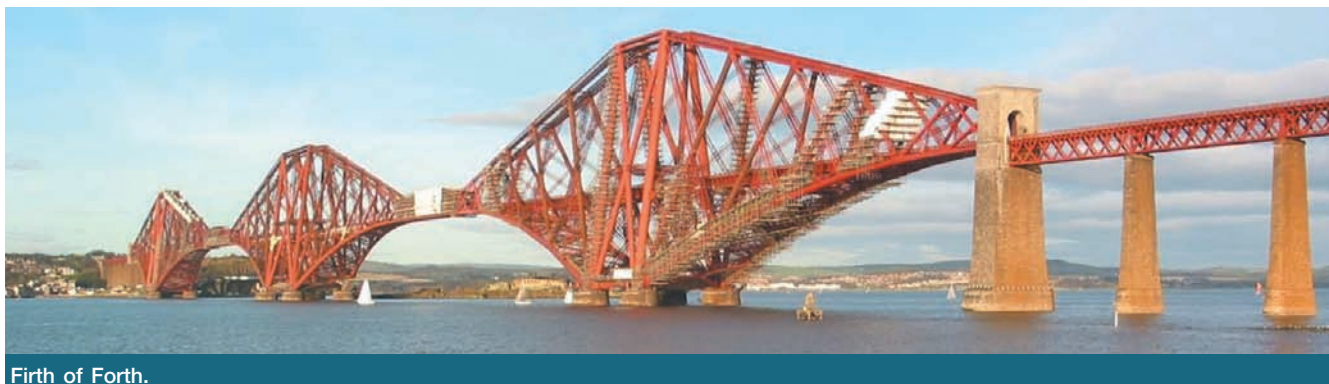
Britannia.

fo de este material se basaba en el abaratamiento de la producción del hierro, material que tenía unas características mecánicas mejores y menos inciertas que los anteriores.

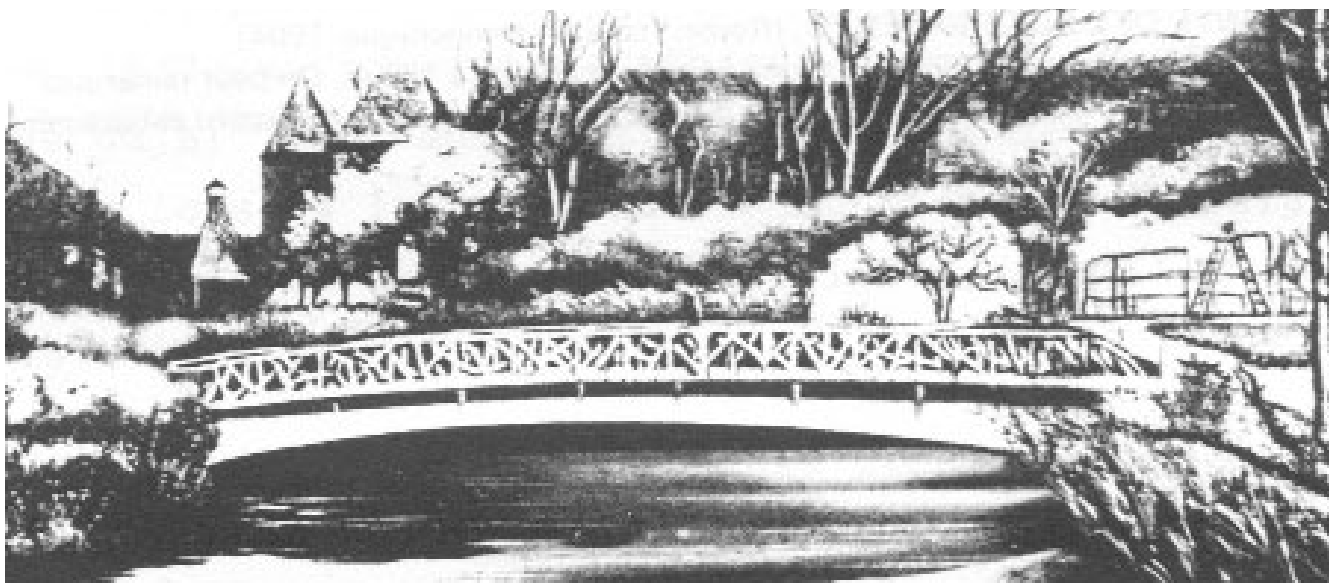
cas mecánicas más fiables. Con la aplicación de rodillos o prensas este se lamina en caliente. El Britannia se construye en 1850 y tiene 142 m de luz. En este caso ya se cambia el

acero se fabricase en grandes cantidades a un precio asequible.

El acero tenía la ventaja de ser un material más dúctil, cualidad muy importante en los puentes. De esa épo-



Firth of Forth.



Puente de Monier en París.

ca hay que nombrar tres grandes puentes: el de Saint Louis sobre el Misisipi, de 157 m de luz, construido en 1874; y el de Brooklyn, en 1889: ambos usaron acero en el tablero. El Firth of Forth, construido en 1890, alcanza una luz de 521 m con viga cantilever.

La técnica de uniones y detalles fue mejorándose de forma que, después de los años 50, apenas se hacen uniones roblonadas utilizándose la soldadura o los tornillos. Hoy en día, la técnica de roblonado ha desaparecido por completo.

Como se ha visto, cada uno de estos cambios venían precedidos por cambios tecnológicos, en general ajenos al mundo de la construcción, que tenían como consecuencia un *abatamiento drástico de un nuevo material*.

2.4. El hormigón armado

En 1824 se patenta el cemento Portland, y la fabricación del hormigón se domina ya a mediados del siglo XIX. En 1875 Monier construye en París una pasarela de hormigón armado. A partir de la patente de Monier, y, posteriormente, de la de Hennebique hay una verdadera profusión de puentes de hormigón armado, mejorándose los detalles y aumentando las luces en la primera parte del siglo XX. Este material se anunciaba como un material eterno



Puente de Luzancy.

que no tenía las desventajas de durabilidad del acero.

2.5. El hormigón pretensado

Eugenio Freyssinet había manejado gatos para descimbrar arcos, o abrirlos en clave. En los años 30 decide invertir todo lo que tiene en desarrollar la idea del pretensado. Tras algún fracaso consigue recalzar una cimentación del puerto del Havre que tenía serios problemas, cosiendo una nueva cimentación con la antigua mediante pretensado. En 1946 construye el puente de Luzancy, de 54 m de luz.

Aunque la idea del pretensado es anterior a Freyssinet, sólo se extiende por todo el mundo cuando se resuelven los detalles.

2.6. Otros materiales

Ha habido realizaciones de puentes en el pasado con otros materiales que, finalmente, no han tenido éxito, en el sentido de no haberse difundido de forma generalizada como ha ocurrido con los materiales antes descritos. Este es el caso del aluminio que, a pesar de haber tenido éxito en otras disciplinas como en la aeronáutica, en la construcción de puentes ha tenido pocas aplicaciones. Las aleaciones de aluminio tienen una gran resistencia específica (relación entre la resistencia y el peso), lo que les haría muy adecuados para puentes móviles. Este fue el caso del puente de Hendon Dock, de 27 m de luz, construido en 1948,

y sustituido unos años después, curiosamente por su avanzado estado de corrosión. Como se ha dicho antes, para que triunfe un material deben estar resueltos los detalles. En este caso, las uniones, hasta hace poco, han sido un problema importante

Los puentes mixtos de hormigón y acero han tenido y tienen un campo de aplicación que se mantiene con altibajos. El éxito de estos puentes parte de la idea de colocar el material económicamente más eficiente en el sitio adecuado. Es decir, poner hormigón en la zona de compresiones y acero en la de tracciones. Además la losa de hormigón tiene la ventaja de repartir las cargas locales del tráfico con un coste muy reducido.

3. El presente

En la actualidad da la sensación que, desde hace años, no ha habido cambios en los materiales de construcción de puentes; sin embargo, eso no es así. La mejora en las prestaciones ha sido constante con un aumento de las resistencias y mejoras en el comportamiento, tanto en el acero como en el hormigón.

3.1. Mejora de materiales tradicionales

En el acero se ha mejorado el comportamiento frente a la corrosión con los aceros autopatinables. Cada vez son más asequibles los aceros termomecánicos con un alto límite elástico y una buena soldabilidad.

En el hormigón, la evolución de las resistencias en los últimos años ha sido espectacular, lo cual se ha reflejado en las norma EHE, cuya última edición considera en su articulado hormigones de hasta 100 MPa. Otras prestaciones, como los hormigones autocompactantes, se popularizan cada vez más.

3.2. Nuevos materiales, aplicaciones

Desde hace unos años se intentan abrir camino una serie de materiales llamados "materiales com-



Hendon Dock.

puestos". Están formados por fibras de vidrio, carbono o basalto, formando tejidos o en filamentos, y todos ellos contenido en una matriz de resina.

El sistema de fabricación puede llevar a perfiles continuos, o bien a superficies más o menos complejas. En este segundo caso, se puede elegir con bastante libertad la posición de las fibras, composición y direcciones.

Las utilización de este material aún es muy limitada y para cubrir necesidades muy específicas, debido a su precio. Por ejemplo, en el montaje de tableros en zonas de muy difícil acceso, necesidades de conservación en atmósferas agresivas, puentes móviles (por su bajo peso).

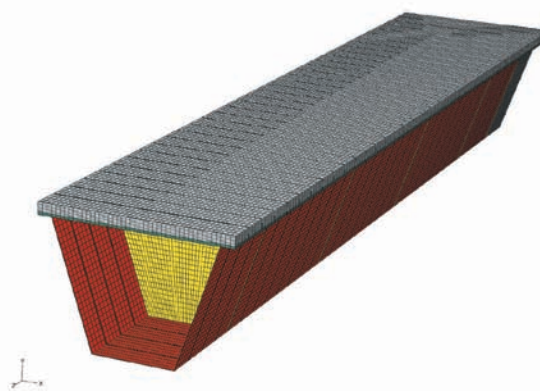
Aún existen dificultades tecnológicas que no están definitivamente resueltas. Por ejemplo:

- Las uniones en caso de perfiles o, incluso, láminas.
- La resistencia a cargas localizadas.
- La conexión con otros materiales.
- Su deformabilidad.
- La falta de ductilidad.

■ La incertidumbre en su comportamiento, que lleva a recomendar coeficientes de seguridad altos.

Cuando estos problemas tengan una solución generalmente aceptada, se podrá decir que esta técnica ha llegado a un nivel de madurez.

En la Dirección Técnica de Ferrovial-Agromán se está llevando a cabo un proyecto de Investigación (Compospan), en colaboración con el Instituto Tecnológico de Aragón (y el apoyo del CDTI), para el desarro-



MEF. Proyecto de investigación Compospan.

llo de un puente desmontable en un dique rebasable de un puerto. En este caso, la necesidad de que sea ligero y de que tenga una fácil conservación, dada la atmosfera agresiva de la salpicadura de agua de mar, hizo que se recomendase este material.

Durante el proyecto, se ha podido comprobar que, además, con estos materiales es posible resistir ni-



Corrosión del acero estructural.

veles de carga muy elevada, pero con deformaciones también elevadas. Uno de los principales objetos de este proyecto es el estudio de soluciones para los problemas enunciados anteriormente.

4. El futuro inmediato

4.1. ¿Qué propiedades se necesitan mejorar?

Para que una innovación tenga la oportunidad de extenderse debe resolver algún problema que el usuario considere importante, y esté dispuesto a asumir el riesgo, en algunos casos, y a pagar un pequeño sobre-



Hormigón autocompactante.



Corrosión con spalling.

precio. Además, la utilización generalizada de un nuevo material suele venir precedida de una bajada importante del precio de ese material. Su utilización llega a la madurez cuando se han resuelto todos los detalles y problemas tecnológicos de la aplicación de ese material en puentes.

Por tanto, la oportunidad de los materiales nuevos está en dar cualidades y prestaciones que ahora no tenemos. Una posible lista de cualidades y problemas que hay que resolver sería:

- La corrosión de armaduras, en el caso del hormigón armado, y es-

pecialmente en zonas marinas o con vialidad invernal. Este es un gran problema a largo plazo. Si el grado de deterioro es grande y se ha producido el *spalling*, el problema puede ser más grave que en el caso de la corrosión del acero estructural, ya que, con una pequeña pérdida de sección, la barra deja de estar anclada, y, por tanto, deja de trabajar. Sería muy útil un acero corrugado con características mejoradas frente a la corrosión, sin que llegue a ser inoxidable, de forma que tenga un precio semejante al corrugado convencional.

- Sin embargo, unos mayores límites elásticos para las armaduras no suponen necesariamente una mayor ventaja, ya que su trabajo va a

venir limitado por la fisuración, excepto que venga con la mejora del punto anterior.

■ Lo anterior es especialmente importante en el acero de pretensar. Por ello, unos cables de materiales no férricos, con un precio asequible, tendrían una gran ventaja.

■ Los hormigones autocompactantes pueden extenderse en el futuro a obras no singulares. Sin embargo, los aditivos que ahora se disponen siguen teniendo un tiempo de actuación muy corto y que disminuye drásticamente con la temperatura. Sería muy útil disponer de los mismos aditivos, pero con un tiempo de actuación más largo.

■ El aumento de la resistencia del hormigón es útil para caso de elementos estructurales con axiles fuertes (pilas o arcos); sin embargo, no es tan útil para la flexión simple ya que sólo sirve para aumentar un poco el brazo mecánico.

■ La disminución del peso de las estructuras supone una ventaja importante, según se aumenta la luz.

■ En el acero estructural también la corrosión es un problema que no ha resuelto completamente el corten, debido a su aspecto estético.

■ Los aceros termomecánicos, con límites elásticos altos y con buena soldabilidad, pueden ser útiles según vayan bajando su precio.

4.2. Comparación entre el rendimiento de diferentes materiales

Dentro del proyecto de investigación mencionado, de un puente de fibras que se está realizando en la Dirección Técnica de Ferrovial, se han hecho comparaciones económicas sobre el coste de una unidad de elemento estructural capaz de resistir una tracción o compresión de 1 kg/cm². De esta comparación, se deduce que el hormigón es varios órdenes de magnitud más barato para resistir compresiones que otros materiales. En tracción, el acero es más barato que las fibras de vidrio, especialmente si los criterios de rigi-

dez son los determinantes.

Sin embargo, el precio puede tener componentes coyunturales. A largo plazo sería más objetivo hacer la comparación en términos de energía. En el libro de J.E. Gordon "Estructuras" se da la *tabla* siguiente en la que compara la energía necesaria para fabricar un elemento con una determinada capacidad estructural, o una determinada rigidez.

Gordon que trabajó para la aero-

En aplicaciones con requerimientos muy especiales:

■ como zonas con atmósferas muy agresivas,

■ o zonas de difícil acceso;

■ o cuando por algún motivo se deba reducir de forma importante el peso propio;

■ o cuando deban resistirse cargas excepcionalmente grandes, siempre que se pueda sobredimensionar el canto, o la flecha no sea un con-

Materiales	Energía necesaria para asegurar una determinada rigidez al conjunto de la estructura	Energía necesaria para producir un panel de una tensión de rotura a compresión determinada
Acero	1,0	1,0
Titanio	13,0	9,0
Aluminio	4,0	2,0
Ladrillo	0,4	0,1
Hormigón	0,3	0,05
Madera	0,02	0,002
Compuesto de fibra de carbono	17,0	17,0

náutica en materiales compuestos dice más adelante:

".....Aquí la ventaja de los materiales tradicionales – madera, ladrillo y hormigón – es descollante. Esta tabla nos hace preguntarnos si la consecución de materiales basados en fibras exóticas está realmente justificada. Lo que realmente es rentable para muchos de los usos comunes de la vida no son las fibras de carbono, sino los huecos..... "

5. Conclusiones

En mi opinión, en el futuro inmediato no se ve un cambio radical en los materiales de construcción de puentes, sino, más bien, una mejora de los materiales que ahora conocemos.

Otros materiales se irán incorporando para resolver problemas específicos, como la reparación de estructuras, la impermeabilización, el equipamiento de puentes.

También es posible que aparezcan soluciones mixtas, que utilicen materiales compuestos de forma localizada en partes del puente.

dicionante;

en estos casos puede que los puentes de materiales compuestos sean la respuesta.

6. Bibliografía

Algunos datos y fotos de este artículo han sido tomados de las siguientes publicaciones, también a través de diferentes páginas web, como "structure.de".

Leonardo Fernández Troyano – "Tierra sobre agua" – Colegio de ICCP – Madrid 1999.

J. E. Gordon – "Structures or why things don't fall down" – Penguin books – London 1978.

José Ramón Navarro Vera – "El Puente moderno en España" – Fundación Juanelo Turriano – Madrid 2001.

Pilas Chias Navarro – "Eduardo Torroja Obras y Proyectos" – Instituto Eduardo Torroja – Madrid 2005.

David B. Steinman – (Traducción Miguel Aguiló) – "Puentes y sus constructores" – Colegio de ICCP- Madrid 2001. ■