

## INGENIEROS DE CAMINOS A LA VANGUARDIA: AERONÁUTICA Y BIOMECÁNICA

### INGENIEROS DE CAMINOS EN LA NASA

[Manuel Chiachio Ruano<sup>1,2</sup>, Juan Chiachio Ruano<sup>1,2</sup>, Guillermo Rus Carlborg<sup>2</sup>]

<sup>(1)</sup> Prognostic Center of Excellence – Intelligent Systems Division

Ames Research Center – NASA

<sup>(2)</sup> Laboratorio de Evaluación No Destructiva – Universidad de Granada

#### (Abstract)

En este artículo, que los autores consideramos de opinión, se aborda una reflexión sobre el presente y el futuro de nuestra profesión desde el punto de vista de la formación, y de cómo, a través de la formación especializada de alto nivel, podemos los ingenieros de caminos abordar trabajos y proyectos en sectores hasta ahora no imaginables. Como ejemplos puntuales, se describen nuestras experiencias en investigación con tejido humano o nuestro actual trabajo como científicos invitados en el Ames Research Center de la NASA.

### 1. INTRODUCCIÓN

La formación del ingeniero ha estado tradicionalmente sustentada sobre materias consideradas “de base” o científicas, como cálculo, geometría, estadística, hidráulica, etc. La hipótesis es que el dominio de estas materias supone el posterior dominio de las materias “técnicas”, que a la postre conlleva a la capacitación necesaria para abordar un problema de complejidad y naturaleza variables, que eventualmente puede desembocar en una innovación tecnológica. Resumidamente, es lo que se conoce como I+D+i.

En la ingeniería civil del presente siglo, o al menos de la primera mitad, se empiezan a vislumbrar tres características definitorias, que reflejan el impacto de la formación científica y la investigación tecnológica sobre el futuro de nuestra profesión.

En primer lugar, la ingeniería civil se desarrollará en un entorno de austeridad económica durante un periodo prolongado, a lo que hay que añadir una sociedad globalizada cada vez más concienciada y con mayor protagonismo social. Por tanto tendremos que replantearnos el “método”.





Segundo, asistimos gradualmente a la unificación de especialidades científicas y tecnológicas que típicamente convivían separadas. Tal es el caso de la Mecánica de Sólidos y la Ingeniería Tisular. A modo de ejemplo, esto hará que un joven ingeniero pueda estar preparado para abordar el diseño y simulación computacional de una córnea humana artificial, al igual que lo hace para una pieza metálica de un puente.

Por último, el incremento exponencial de la capacidad computacional y la proliferación de software especializado, que desde hace unos 15-20 años está revolucionando la forma de hacer ingeniería. Más pronto que tarde, la capacidad técnica del ingeniero va a dejar de ser valorada para dejar paso a su creatividad y su capacidad científica, ya que gran parte del trabajo no creativo será preferiblemente realizado por un ordenador.

En este artículo, se da una visión divulgativa sobre todos los aspectos mencionados anteriormente, desde la experiencia particular de nuestro trabajo en sectores no tradicionales de la profesión.

La siguiente sección se dedica a exponer algunas nociones tecnológicas de un material aeroespacial que comienza a emerger en la ingeniería civil. En el apartado 3 se describe nuestro trabajo en la NASA en relación con el citado material. Una tecnología procedente de la medicina, que comparte los mismos principios que la mecánica racional y, por tanto, la misma base científica, es expuesta en el apartado 4. El apartado 5 concluye con una reflexión sobre nuestra formación.





## 2. MATERIALES AERONÁUTICOS EN LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL

### 2.1. Descripción

Desde la aparición del hormigón pretensado no se han experimentado avances significativos en ingeniería civil en cuanto al surgimiento de nuevos materiales estructurales, aunque sí que se ha profundizado en el conocimiento del comportamiento y en la mejora de las técnicas constructivas de los materiales tradicionales (hormigón-acero). Sin embargo, en los últimos años, se está asistiendo al inicio de una nueva revolución tecnológica en la ingeniería civil con la aplicación de materiales avanzados de alta eficacia, como los materiales compuestos de fibra de carbono y vidrio.

En general, el material compuesto (también llamado *composite*), está formado por la combinación dos materiales que funcionan solidariamente a nivel tensional: fibras y matriz. Las fibras, generalmente filamentos sintéticos de carbono o de vidrio de diámetro del orden de las micras, son las encargadas de soportar la carga debido a su elevada resistencia a tracción, que se sitúa entre 0,8 y 5,5 [GPa] dependiendo del tipo de fibra [1]. La matriz envuelve y protege a las fibras y transfiere las cargas entre fibras. Existen numerosos tipos de matrices, siendo las epoxy las más usadas en aplicaciones estructurales por su estabilidad termoquímica y resistencia mecánica. A lo anterior, hay que añadir el bajo peso específico de ambos materiales, lo que procura un material de alta resistencia y a la vez, muy ligero (generalmente entre 1400 y 1700 [Kg/m<sup>3</sup>]). La resistencia mecánica de la matriz es un orden de magnitud menor que la de la fibra, por ello la matriz es el elemento que transfiere las cargas a las fibras, pero no la soporta. En consecuencia, los materiales compuestos tienen la mayor rigidez y resistencia en la dirección de las fibras, y la mínima en dirección transversal a la fibra. Esa característica es toda una ventaja cuando se sabe explotar la anisotropía intrínseca del material [2]. La forma en la que se produce generalmente un *composite* es mediante el apilado de capas de fibra orientadas en distintos ángulos, resultando un material cuyas propiedades dependen de la secuencia de apilado, junto a las propiedades intrínsecas fibra y matriz. Eso hace que dos laminados fabricados con la misma fibra y resina, y exactamente con el mismo espesor, puedan tener resistencias y rigideces completamente dispares en función del diseño del apilado del mismo. Por ello, diseñar estructuras con materiales compuestos pasa por una primera fase de diseño y configuración del propio material.

Las excelentes propiedades mecánicas de estos materiales junto a la versatilidad de diseño intrínseco del material, permiten explorar nuevos campos formales en la ingeniería civil que hasta ahora han sido imposibles o prohibitivos.

Además de la alta eficacia, entendida ésta como la relación entre la capacidad de carga y el peso del material, otras características que los hacen muy atractivos para ingeniería civil son:



- Estabilidad térmica y ausencia de corrosión, por lo que se reducen radicalmente los costes de mantenimiento a lo largo de la vida útil.
- Reducción drástica de los costes de transporte, ensamblaje y ejecución, todo ello debido a la alta ligereza del material, lo que a su vez deriva en otros beneficios como el aumento de la seguridad laboral, reducción de plazos de construcción, mínima afección al entorno ambiental de la obra, etc.
- Transparencia electromagnética, que los hace idóneos para soluciones en las que se requiera mínima interferencia con sistemas de comunicaciones críticos como en el caso de estructuras ferroviarias, aeropuertos e instalaciones militares.
- Aportación tecnológica a un sector tradicional como el de la construcción, condicionado por la escasa tecnificación y cualificación de la mano de obra. Con la proliferación de estas tecnologías en nuestro país, se podría facilitar la introducción de mano de obra más especializada, que a su vez favorecería la proliferación de nuevos mercados asociados a estos materiales.

En la última década se está asistiendo a un aumento importante de las aplicaciones de materiales avanzados en construcción, y en particular en estructuras de ingeniería civil [3, 4]: puentes, pasarelas peatonales, estructuras de arquitectura singular y estructuras off-shore. Sólo en Estados Unidos se prevé en 2013 una inversión de 6.100 Me en *composites* para aplicaciones en la construcción [5]. Otros países como Japón, Suiza y Dinamarca, ente otros países tecnológicamente avanzados, cuentan ya con varios puentes y estructuras de ingeniería realizadas íntegramente con estos materiales, aunque por la falta de normativas regladas del material, se trata de realizaciones de escasa luz<sup>1</sup> [6]. Así mismo, en algunos de estos países se ha creado una red empresarial en torno a los nuevos materiales, que está suponiendo en ciertos casos un importante impulso económico y una renovación al sector de la construcción (véase como ejemplo el [Composite Park](#), situado en Francia).

En España se contabilizan escasas realizaciones: pasarela en fibra de vidrio sobre la LAV Madrid-Barcelona en Lérida (Cataluña), pasarela sobre el Río Manzanares, pasarela peatonal de Sant Fruitós de Bages (Cataluña) o la pasarela sobre la ría de Narrondo en Zumaia (País Vasco). Todas ellas están basadas en diseños heredados de los materiales tradicionales, algo que ha sido poco recomendado en las recientes publicaciones del 'estado del arte' [7]. Por el contrario, los foros especializados del material compuesto recomiendan para la ingeniería civil y estructural buscar formas óptimas que aprovechen al máximo las características anisótropas de estos materiales, con especial énfasis en la seguridad [8, 9].

---

<sup>1</sup> Más información se puede encontrar en [este link](#).



Recientemente, se están dando pasos importantes para la introducción de estos materiales en estructuras de alta responsabilidad en nuestro país [10]. En esa labor, resulta crucial poder asegurar la seguridad estructural teniendo en cuenta la fiabilidad a largo plazo del material [11].

### 3. NUESTRO TRABAJO EN LA NASA EN RELACIÓN A LOS MATERIALES COMPUESTOS

En *composites*, uno de los procesos más importantes a considerar es la degradación por fatiga, por su impacto en la seguridad a largo plazo. Pese a que el comportamiento a fatiga del material compuesto supera al del acero, el material compuesto presenta un proceso de degradación multiescala que se inicia desde los primeras etapas de la vida del material, y además el proceso está sujeto a incertidumbre. A lo anterior, también contribuye la falta de experiencia, por la práctica ausencia de realizaciones que estén al final de su vida útil y que puedan reportar información procedente de la monitorización. Durante las últimas décadas, se ha hecho un gran esfuerzo de investigación en lo referente a modelos físicos de daño por fatiga, simulaciones numéricas del daño y extensos programas experimentales [12–14].

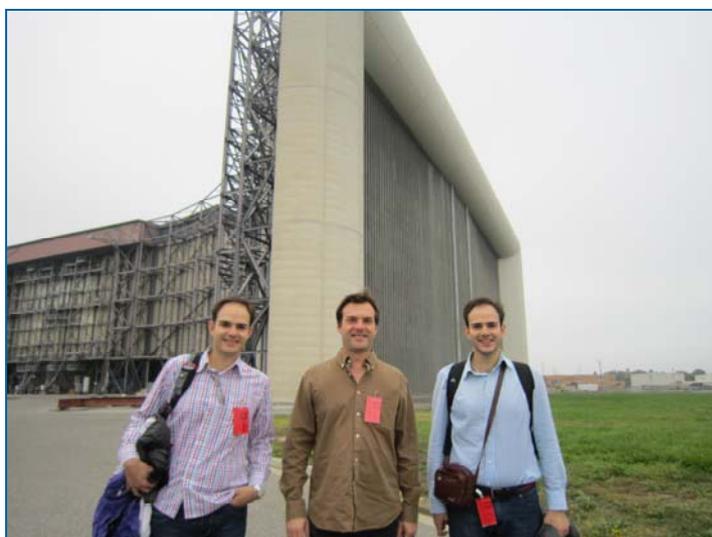
Sin embargo, los modelos de evolución de daño por fatiga en materiales compuestos, aun estando sólidamente fundados en conceptos físicos o mecánicos, necesitan ajustes experimentales. Por ello, la incertidumbre contenida en los datos experimentales debe ser tomada en cuenta en el proceso de modelización. Pero adicionalmente a esta incertidumbre de medición, la incertidumbre del propio modelo de representar fielmente la realidad del sistema suele ser, en fatiga de *composites*, órdenes de magnitud superior a la primera [15, 16]. No se habla por tanto de un modelo para predecir la fatiga, sino de clases de modelos plausibles. El problema inverso Bayesiano [17] proporciona un marco riguroso para tener en cuenta ambas fuentes de incertidumbre en modelos y datos, proporcionando la probabilidad (entendida como plausibilidad) de un conjunto de clases de modelos y parámetros de diseño dado un conjunto de datos experimentales de daño por fatiga. La metodología que se adopta implementa automáticamente una “cuchilla de Ockham” cuantitativa, en el sentido de que proporciona una medida del sobreajuste de un modelo en relación a la complejidad del mismo [18]. Los modelos y parámetros más plausibles son posteriormente incorporados en algoritmos de inteligencia artificial para hacer pronóstico, como los Filtros de Kalman [19] o más generalmente Filtros de Partículas [20], con objeto de que una estructura pueda hacer de forma autónoma pronósticos robustos [18] de vida remanente a fatiga y probabilidad de fallo.

Este trabajo se está desarrollando en el Prognostic Center of Excellence (PCoE) de la NASA, donde se trabaja en sistemas integrados de diagnóstico y pronóstico de salud estructural. En especial, en este centro se llevan a cabo trabajos sobre predicción de fallo para sistemas mecánicos de alta responsabilidad y de difícil inspección, como mecanismos de robots



desplegados en el exterior, baterías de satélites, etc. También se trabaja en el desarrollo de algoritmos basados en Inteligencia Artificial para aplicaciones de pronóstico de fatiga en estructuras aeronáuticas.

El PCoE pertenece al Ames Research Center, que es uno de los mayores centros de la NASA. Este histórico centro de la NASA, situado en pleno Silicon Valley, California, destaca por sus laboratorios de astrobiología, nanosatélites, robótica e inteligencia artificial. En la comunidad aeronáutica, este centro es además conocido internacionalmente por alojar el mayor túnel de viento del mundo, junto a varios más que cubren todo el espectro de regímenes de velocidades de viento<sup>2</sup> (desde el subsónico al hipersónico). Como curiosidad, se indica que el primero de los túneles citados, albergó recientemente el ensayo de despliegue del paracaídas del Robot Curiosity, en su operación de llegada a la superficie de Marte.



Sección de entrada del túnel de viento "full-scale". De izqda. a dcha., Manuel Chiachio, Guillermo Rus y Juan Chiachio.

#### 4. DE LA MECÁNICA RACIONAL A LA INGENIERÍA BIOMÉDICA

La medicina está demostrando cada vez más su necesidad de ingenieros de todas las disciplinas: estructurales cuando hace falta profundizar en el funcionamiento de la estructura del esqueleto; de materiales para entender los tejidos; hidráulicos para afrontar problemas de circulación o cardíacos, etcétera. Varios de estos ejemplos nos ilustran que la línea divisoria entre disciplinas como la medicina, la ingeniería o las ciencias matemáticas se está borrando completamente.

Uno de los ejemplos que está atrayendo gran parte de la atención de la ingeniería es el hueso. El hueso humano es un material extraordinariamente complejo por su estructura interna, que

<sup>2</sup> La foto muestra una porción del túnel hipersónico



además está en continua regeneración. El material se concentra en el contorno, llamado parte cortical, maximizando el momento de inercia, mientras que el interior lo ocupa un entramado poroso llamado trabecular de fibras que se alinean con las tensiones principales para transmitir las con la máxima eficiencia, a modo de "alma" de una sección. Si observamos al microscopio la estructura jerárquica a diferentes escalas nos sorprenderemos aun más. Comprender, simular y monitorizar esta estructura requiere de una estrecha colaboración entre especialistas, y es el único camino para resolver los tan extendidos problemas de osteoporosis, que afectan sólo en España a 2 millones de mujeres, una de cada dos mujeres mayores de cincuenta años. Peor aún, el 20% de ellas sufre fractura de cuello femoral antes de un año desde su diagnóstico, generalmente con complicaciones después de la cirugía.

Otro ejemplo es el parto prematuro, la mayor causa de mortalidad infantil en la actualidad, que afecta al 11% de todos los nacimientos. No existe hoy en día ninguna técnica capaz de pronosticarlos de forma fiable, y de nuevo los ingenieros entramos a aportar una posible solución. El cuello del útero se compone de una estructura de fibras de colágeno, elastina y otros componentes con la formidable tarea de metamorfosearse hasta permitir una dilatación de varios órdenes de magnitud que permita el parto. Estamos desarrollando modelos computacionales mecánicos que reproduzcan el fenómeno, así como sensores basados en ultrasonidos, que no son más que ondas mecánicas como las sísmicas, con objeto de monitorizar esos cambios y por primera vez pronosticar la fecha del parto prematuro.

Uno de los retos más emocionantes a los que se asoma la ingeniería consiste en fabricar nuevos tejidos u órganos artificiales a partir de células madre del propio donante, constructos de diversa índole, impresoras 3D de tejidos, etc., a través de una familia de capacidades ingenieriles al servicio de la sociedad.

Estas y otras actividades están en el foco de las prioridades de los centros de investigación en ingeniería de las universidades más prestigiosos del mundo (Caltech, MIT, UCL, La Sorbona), que no dudan en clausurar departamentos de ingeniería obsoletos para fundar unidades de investigación en proyectos como los anteriores.

## 5. REFLEXIONES SOBRE NUESTRA FORMACIÓN

Todo lo expuesto anteriormente es un mero ejemplo más de ingenieros de caminos que desarrollan su trabajo en el campo de lo que el Colegio llama "Sectores No Tradicionales". Desde nuestro punto de vista, el trabajo que hoy se desarrolla en estos sectores servirá para que pueda ser incorporado como parte de nuestra profesión; esta vez, ya asumido como un sector tradicional. Suponemos que a medio-largo plazo, este proceso se consolidará por la necesidad de mejora en la competitividad del sector, y también por la actual



internacionalización forzosa de los recién egresados en busca de oportunidades de empleo fuera de sus fronteras (físicas y del conocimiento).

Cuando un ingeniero afronta el ejercicio de la profesión en sectores emergentes de la ingeniería, se suele encontrar ante el problema de la ausencia de normas, estándares, recomendaciones de diseño, etc.; en definitiva, por la falta de experiencia. Y ello exige trabajar desde el conocimiento. Dicho de otra forma, experiencia es igual a conocimiento en aquellos casos en los que la tecnología es madura. En el caso de afrontar un cambio tecnológico, la experiencia pierde valor en favor del conocimiento de base, que es el científico.

En estos momentos, en los que estamos afrontando un cambio drástico de paradigma en la profesión, y en los que estamos adoptando y desarrollando nuevas tecnologías para incrementar nuestra competitividad, es cuando más se requiere una formación basada en la amplitud y solidez del conocimiento de base. Qué duda cabe que a lo anterior hay añadir una formación técnica complementaria, que permita al ingeniero salvar la distancia que hay entre el "papel" y el prototipo, el modelo, la máquina, la obra, o cual fuere el artilugio de que se trate.

Sin embargo, nuestras Escuelas, inmersas en el proceso de adaptación al Espacio Europeo de Educación Superior o Plan Bolonia, no están atendiendo con rigor a las necesidades actuales de nuestra profesión: programas de estudios reducidos, supresión de algunas de las materias científicas básicas a favor de materias informativas (o de recetario), etc. Pero más grave es aún la falta de atención de los planes de estudio a los indicadores de evolución de la tecnología y de los nichos de competencias emergentes. Como dato, se aporta que prácticamente ninguna Escuela de Caminos incorpora en su plan de estudios alguna asignatura reglada de materiales compuestos, cuando muchos países de Europa, EE.UU y Canadá están requiriendo ingenieros estructurales con conocimientos de materiales compuestos de fibra de carbono. Y esto es por citar sólo un sector en el que tenemos información fehaciente, quedando a un lado otros posibles nichos de empleo, como en el sector de las energías renovables, ingeniería de viento, biomecánica, monitorización, gestión integral de cuencas, ciudades inteligentes, finanzas en la gestión de infraestructuras, etc.

Por desgracia, o mejor, por las circunstancias, ahora no se justifica pensar que estas reflexiones provienen de algún grupo de visionarios con escasa penalización por la práctica. No nos queda mejor opción a los jóvenes ingenieros que plantearnos afrontar el futuro de la profesión como un reto de cambio drástico de la del presente.

Nuestra labor ahora consiste en desarrollar nuestra profesión pese a la herencia recibida. Consiste también en volver a poner nuestra profesión al servicio de la sociedad, dejando de lado los *lobbies* político-económicos, y ello, aunque tenga que ser fuera de nuestras fronteras.

### Agradecimientos

Nos gustaría agradecer a la Demarcación de Castilla y León del Colegio de ingenieros de Caminos, Canales y Puertos la oportunidad que nos ha brindado para la publicación de este artículo. En especial a su secretario Javier Muñoz Álvarez por su paciencia y especial interés. Además, agradecemos a nuestros compañeros del Laboratorio de Evaluación No Destructiva de la Universidad de Granada, por sus aportaciones en los debates y seminarios en los que discutimos sobre estos y otros asuntos de nuestra profesión, la mayoría de los cuales están aquí reflejados.

### Referencias

- [1] D.-H. Kim, Composite structures for civil and architectural engineering, Taylor & Francis, 1994.
- [2] S. W. Tsai, Strength & life of composites, Stanford University, 2008.
- [3] R. Stewart, Composites in construction advance in new directions, Reinforced Plastics 55 (5) (2011) 49–54.
- [4] C.Bakis, L.C.Bank, V.Brown, E.Cosenza, J.Davalos, J.Lesko, A.Machida, S.Rizkalla, T.Triantafil-Hou, Fiber-reinforced polymer composites for construction-state-of-the-art review, Journal of Composites for Construction 6 (2) (2002) 73–87.
- [5] Lucintel, Emerging Carbon Fiber Applications 2011-2016: Trends, Forecast and Opportunity Analysis, Tech. Rep., 2011.
- [6] T. Keller, Use of fiber reinforced polymers in bridge construction, International Association for bridge and Structural Engineering IABSE, 2003, 2003
- [7] L. Hollaway, A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties, Construction and Building Materials 24 (12) (2010) 2419–2445.
- [8] C. J. Burgoyne, Advanced composites in civil engineering in Europe, Structural Engineering International 9 (4) (1999) 267–273.
- [9] M. Chiachio, J. Chiachio, G. Rus, Reliability in composites—A selective review and survey of current development, Composites Part B: Engineering .





- [10] F. Bosch Cantallops, Carlos; Hué García, Los materiales innovadores, composites y reciclados. Una herramienta de futuro para el proyectista y el constructor, Revista de Obras Públicas 151 (3449) (2004) 117–122.
- [11] L. Van Den Einde, L. Zhao, F. Seible, Use of FRP composites in civil structural applications, Construction and building materials 17 (6) (2003) 389–403.
- [12] R. Talreja, C. V. Singh, Damage and failure of composite materials, Cambridge University Press, 2012.
- [13] R. Talreja, Damage and fatigue in composites—a personal account, Composites Science and Technology 68 (13) (2008) 2585–2591.
- [14] J. Degrieck, W. Van Paepegem, Fatigue damage modeling of fibre-reinforced composite materials: review, Applied Mechanics Reviews 54 (4) (2001) 279–300.
- [15] J. Chiachio, M. Chiachio, G. Rus, J. L. Beck, Predicting Fatigue Damage in Composites. Part I: A Markov Chain Model, Submitted to Structural Safety .
- [16] M. Chiachio, J. Chiachio, G. Rus, J. L. Beck, Predicting Fatigue Damage in Composites. Part II: A Bayesian Framework, Submitted to Structural Safety .
- [17] A. Tarantola, Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameters Estimation, Siam, 2005.
- [18] J. Beck, Bayesian system identification based on probability logic, Structural Control and Health Monitoring 17 (7) (2010) 825–847.
- [19] A. Harvey, Forecasting, structural time series models and the Kalman filter, Cambridge university press, 1991.
- [20] A. Doucet, N. De Freitas, N. Gordon, Sequential Monte Carlo methods in practice, Springer Verlag, 2001.