

Desarrollo de una carrocería de material compuesto de fibra de carbono para un coche de radiocontrol mediante la metodología de aprendizaje PBL

A. Gomendio, M. Zabala, A. Cuende, L. Aretxabaleta, J. Aurrekoetxea

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial. Mondragon Unibertsitatea
agomendio@mondragon.edu

Los alumnos y alumnas de 5º curso de Ingeniería Industrial, tanto de la especialización de Mecánica Estructural como de Materiales y Procesos, han realizado un proyecto multidisciplinar durante el último semestre basándose en la metodología PBL (Problem or Project Based Learning). El objetivo ha consistido en desarrollar una carrocería en material compuesto reforzado con fibra de carbono para un coche de radiocontrol eléctrico a escala 1/18. Los conocimientos necesarios para la realización del proyecto están asociados a la Gestión de Proyectos, Ingeniería de Producto, CAD 3D, Prototipado rápido, Mecánica de Compuestos y Fabricación de Compuestos. El proyecto ha tenido dos vertientes complementarias, una académica en la que se han evaluado las competencias tanto científico-técnicas como transversales, y otra de competición que ha fomentado la motivación del alumnado y ha servido de escaparate para mostrar y difundir el resultado del trabajo en público.

1. INTRODUCCIÓN

La estrategia de la Escuela Politécnica Superior de Mondragon Unibertsitatea (EPS-MU) para implementar la metodología *MENDEBERRI* [1] en el quinto curso de Ingeniería Industrial se articula alrededor de un proyecto multidisciplinar que integra asignaturas de diferentes áreas de conocimiento. Los equipos de trabajo están formados por estudiantes de las dos especialidades de las que dispone EPS-MU, Mecánica Estructural y Materiales y Procesos. El proyecto tiene dos vertientes complementarias, una académica en la que se trabajan y evalúan tanto las competencias científico-técnicas como las transversales, y otra de competición que fomenta la motivación del alumnado y se utiliza para difundir al público el resultado del trabajo. El objetivo del proyecto consiste en desarrollar una carrocería en material compuesto reforzado con fibra de carbono para un coche de radiocontrol eléctrico a escala 1/18. El punto de partida se basa en una plataforma estándar que incluye todo el sistema de tracción y dirección (figura 1) y ciertas especificaciones como dimensiones máximas de la carrocería, modelo biplaza, espesor máximo 1mm... Durante el proyecto se abordarán las diferentes fases que componen el desarrollo de un nuevo producto desde la definición de la carrocería hasta la promoción, pasando por la fabricación y el ensayo.



Figura 1. Plataforma del coche de radiocontrol

Según David Kolb [2] "la experiencia se refiere a toda la serie de actividades que permiten aprender". Este artículo pretende compartir esta experiencia para que sirva de ejemplo.

En total han participado 48 alumnos repartidos en 8 grupos, y han colaborado 24 personas del personal docente en las diferentes fases y actividades relacionadas con el proyecto.

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

Las fases o etapas del proyecto han sido las siguientes:

2.1. Organización del equipo de trabajo

Si bien hay hitos impuestos por la disponibilidad de los laboratorios de fabricación y ensayo, la concepción de las fases, responsabilidades de cada componente y mecanismos de coordinación deben ser definidos por cada equipo.

2.2. Posicionamiento y *styling* del coche

En el posicionamiento cada grupo define las especificaciones (consumo, precio, rigidez, *crashworthiness*...) y realiza una priorización dándole un valor que va desde el 1 hasta el 8 a cada una de ellas. Todas las decisiones posteriores (diseño, selección de materiales, fabricación) deben ser coherentes con estos vectores justificando siempre la elección. Uno de los aspectos más importantes es el *styling* del coche, que debe responder a aspectos estéticos, ergonómicos, estructurales y de fabricación. Como resultado final de esta tarea cada equipo debe generar un modelo de CAD 3D dibujado con Unigraphics.

2.3. Diseño y cálculo estructural de la carrocería

Para la fabricación del coche se dispone de cuatro tipos de tejidos; dos de fibra de carbono (unidireccional y bidireccional) y dos de fibra de vidrio (bidireccional y mat). La resina es para todos la misma (epoxi). El diseño debe estar basado en la rigidez específica de la carrocería. Deben utilizar principios de micromecánica y el método de los elementos finitos (ABAQUS) para optimizar la rigidez a torsión y el peso.

2.4. Fabricación de la carrocería

El proceso de fabricación consta de los siguientes tres hitos: 1) la fabricación de la carrocería en material compuesto, 2) la fabricación con la impresora 3D de los elementos auxiliares complejos (alergones, parachoques...), y 3) el ensamblaje y acabado de la carrocería.

La fabricación de la carrocería en material compuesto consta de tres fases. En la primera hay que fabricar el molde. Para ello se parte del diseño CAD 3D y se genera el programa de CNC mediante CAM. Durante la fase de diseño se verifica que no hay contrasalidas y que se respetan los ángulos de desmoldeo. Todos los moldes serán hembra y se mecanizan a partir de un bloque de resina de fácil mecanización (figura 2).



Figura 2. Mecanizado de los moldes

Tras el mecanizado el molde debe ser pulido y se debe aplicar el desmoldeante. Una vez los grupos disponen del molde pueden empezar a definir las preformas de tejidos. Las orientaciones y número de capas de material en cada zona deben respetar lo diseñado anteriormente en el modelo de elementos finitos. La deformabilidad de las telas es limitada y ello conlleva a que deban hacerse pruebas sobre el molde antes de impregnarlas de resina, evitando grandes distorsiones y procurando que los solapes coincidan con las zonas críticas (figura 3).



Figura 3. Diseño de las preformas

El siguiente paso consiste en fabricar el laminado mediante contacto a mano y bolsa de vacío (figura 4). Cada grupo tiene que preparar la resina, impregnar el laminado mediante la brocha y el rodillo, y finalmente sellar el molde con la bolsa para poder hacer vacío. El curado se realiza a temperatura ambiente durante las primeras 3 horas y posteriormente se introduce en un horno a 80 °C durante 8 horas.



Figura 4. Fabricación del laminado por contacto a mano y bolsa de vacío

Las partes más complejas y de gran nivel de detalle (alergones, difusores, parachoques...) se fabrican mediante la impresora 3D (figura 5). El número de piezas y el volumen de las mismas son limitaciones impuestas por la organización.



Figura 5. Fabricación de los elementos auxiliares mediante la impresora 3D

Finalmente se ensamblan las piezas de la impresora 3D a la carrocería de material compuesto (figura 6), lijarse la superficie, pintar y decorar el coche.



Figura 6. Acabado de la carrocería

El coste de la carrocería se determina a partir del tiempo de mecanizado del molde, el tipo y cantidad de fibra y el volumen de las piezas fabricadas en la impresora 3D.

2.5. Ensayos de verificación

Los aspectos técnicos que se valoran son la rigidez específica y la seguridad ante impactos.

Para clasificar de mejor a peor todas las carrocerías se utiliza el *BSE (Body Structure Efficiency index)*, que pondera la rigidez a torsión y la masa de la carrocería. El par torsor se aplica en los puntos de anclaje delanteros, mientras los traseros se empotran para evitar cualquier tipo de desplazamiento. La masa aplicada es veinte veces la masa de la carrocería, y se mide el ángulo de giro (figura 7). Los resultados experimentales se contrastan con los obtenidos en la simulación. En todos los casos la simulación ha dado resultados de *BSE* menores que los experimentales, demostrando que las diferencias entre el modelo virtual y el físico son grandes, y que para poder optimizar bien la estructura hay que tener en cuenta las singularidades inherentes a la fabricación (desalineamiento de fibras, deformación del tejido, solapes, tensiones internas...). Cada grupo debe recoger en la memoria final las desviaciones, así como la causas de las mismas.



Figura 7. Dispositivo de medida de la rigidez a torsión

El segundo aspecto técnico evaluado ha sido la seguridad ante impactos. Se ha desarrollado un ensayo que simula uno de los escenarios de accidente más severos, el choque frontal contra un poste. El ensayo se realiza en una máquina de caída de masa instrumentada. La energía de impacto es de 50 J (5 kg desde 1 m), el impactor es cilíndrico (equivalente al diámetro de una farola a escala 1/18) y se registra la curva de impacto fuerza-tiempo para evaluar la deceleración. Los criterios de evaluación del ensayo son dos; el nivel de intrusión (el impactor nunca debe penetrar en el habitáculo de los pasajeros, figura 8a), y la deceleración máxima (figura 8b) que se alcanza (a partir de deceleraciones de 20 g, los riesgos de sufrir lesiones cerebrales graves es muy alta [3]).

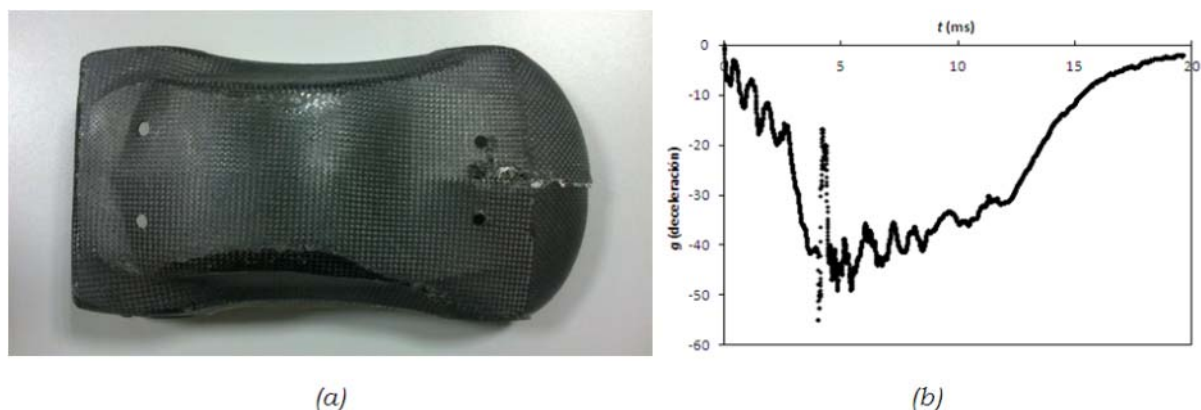


Figura 8. Resultado del ensayo de crash; (a) nivel de intrusión, (b) curva de deceleración

2.6. Exposición de coches

El día de San Pancracio, fiesta patronal de EPS-MU, se organizó una exposición en la que cada grupo concursaba mostrando su prototipo con la ficha técnica correspondiente. Los asistentes, tras visitar los stands y escuchar los argumentos de venta de cada equipo, votaban por el coche que comprarían. En total participaron más de 150 personas en la votación.

La figura 9 muestra las ocho carrocerías que participaron en el concurso y sus correspondientes marcas.

RED BOLT



RED MUN



CANYONERO



KASKELOTTI



RC DREAMS



MONTINNI



JAAV



RED DEVIL



Figura 9. Carrocerías que se presentaron al concurso

2.7. Pruebas dinámicas y la carrera

Dentro de la parte lúdica del proyecto se han organizado varias pruebas dinámicas en las que, a decir verdad, cuenta más la pericia del piloto que las prestaciones de la carrocería. Las pruebas dinámicas han consistido en una primera prueba de aceleración lineal y otra de aceleración lateral denominada skip-pad que consiste en girar alrededor de dos conos distanciados realizando trayectorias en forma de 8. Por último, tras realizar los entrenamientos libres y la clasificación, el día de San Pancrancio se realizó la carrera en pista en dos tandas (figura 10).



Figura 10. Momento de la carrera y parrilla de salida

2.8. Divulgación

La divulgación del proyecto se ha realizado mediante cuatro vías diferentes; 1) la presentación del trabajo en el XIX CNIM, 2) la realización de un video de 4 minutos de duración por grupo que se ha colgado en YouTube, 3) la realización de un reportaje para el programa de divulgación científico-tecnológica TEKNOPOLIS emitido el 20 de mayo en ETB1 y ETB2, y 4) la publicación de noticias en el blog de Ingeniería Industrial de Mondragon Unibertsitatea.

3. EVALUACION DEL PROYECTO

La evaluación del proyecto se realiza en base a la ejecución de las diferentes fases, la consecución de los objetivos, los entregables a lo largo del proyecto, la memoria final, la realización de un vídeo que recoge todo el proceso y una defensa escrita.

Cabe destacar que la evaluación ha sido continua a lo largo de todo el proceso realizando *feedback* de cada entregable permitiendo así corregir o implementar los diferentes aspectos en la memoria final.

4. METODOLOGIA PBL COMO METODO DE APRENDIZAJE EFECTIVO

Una de las múltiples ventajas de la metodología PBL se basa en que potencia que el aprendizaje sea profundo (deep learning) y por lo tanto más efectivo que el superficial (surface learning) [4]. Para medir el aprendizaje profundo durante el desarrollo del proyecto de la carrocería se emplea el cuestionario contrastado de Dolmans et al [5]. Dolmans desarrolla un cuestionario adaptado al PBL basándose en el cuestionario de Biggs et al [6] R-SPQ (Revised two-factor Study Process Questionnaire) denominado PBL-R-SPQ de Dolmans. Las valoraciones del cuestionario van del 1 al 5. La tabla 1 muestra el resultado del aprendizaje superficial y profundo durante el proyecto y se observa que el aprendizaje profundo ha sido mayor que el superficial.

Tipo de aprendizaje	Promedio	σ
Aprendizaje Profundo	3.3	1.17
Aprendizaje Superficial	2.52	1.13

Tabla 1. Resultados del cuestionario PBL-R-SPQ (Dolmans)

5. CONCLUSIONES

La conclusión principal del presente proyecto es que el aprendizaje basado en un proyecto multidisciplinar que abarca desde la idea inicial hasta la ejecución final ha supuesto una experiencia sumamente enriquecedora tanto para el alumnado como para el equipo docente. La motivación ante un proyecto abierto, en el que el grado de autonomía es elevado y la libertad para decidir es considerable, supone un gran reto y genera un sentido de responsabilidad que afianza más los conocimientos adquiridos. Por otra parte, la gran cantidad y diversidad de temáticas necesarias para la realización del proyecto hace que el trabajo en grupo sea complejo pero muy instructivo y el nivel de compromiso hacia el trabajo de los demás integrantes del grupo haya sido muy alto.

La buena aceptación del proyecto por parte de los estudiantes involucrados, el interés de los estudiantes de cursos inferiores y la valoración académica positiva del profesorado y la institución han permitido que el curso 2012-2013 se repita la experiencia en 2º curso del Máster en Ingeniería Industrial de Mondragón Unibertsitatea donde intervendrán diferentes asignaturas.



Figura 11. Foto de grupo con las carrocerías desarrolladas

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la buena disposición y el duro trabajo realizado por todos los estudiantes y el personal docente involucrado. Los autores también están agradecidos a MONDRAGON AUTOMOCIÓN por la colaboración prestada.

7. REFERENCIAS

- [1] M.I. Zubizarreta, "Innovación del proceso enseñanza-aprendizaje de la titulación de Ingeniería Técnica en Electrónica Industrial. Un estudio de caso", Tesis Doctoral, Univ. Deusto, Bilbao, (2006).
- [2] D. Kolb, "Experiential learning: Experience as the source of learning and development", Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.(1984) ISBN 0132952610.
- [3] G. C. Jacob, J. F. Fellers, S. Simunovic, J. M. Starbuck, "Crashworthiness of automotive composite material systems", J Appl Polym Sci 92 (2004) 3218-3225.
- [4] J. B. Biggs, K. F. Collins, "Evaluating the Quality of Learning: The SOLO Taxonomy", New York: Academy Press (1982).
- [5] D. Dolmans, I. Wolfhagen and P- Ginns, "Measuring approaches to learning in a problem based learning context", International Journal of Medical Education, 1:55-60 (2010).
- [6] J. Biggs, D. Kember, DYP Leung, "The Revised two factor Study Process Questionnaire: R-SPF-2F", Brit J Educ Psychol, 71:133-149 (2001).