

ANÁLISIS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CHÁSIS AUTOPORTANTE DE MATERIAL COMPOSITE

Juan Velázquez¹, Jordi Llumà¹, Carlos Sánchez², Eva Martínez¹, Carlos Ruiz¹

(1) Universitat Politècnica de Catalunya

Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona

(2) Divisió Mecànica SENER (Barcelona)

juan.velazquez@upc.es

Resumen

Esta ponencia presenta el análisis estructural de un chasis autoportante para un vehículo monoplaza de bajo consumo, realizada en materiales compuestos.

Este estudio comprende el análisis de los modos propios de vibración y su incidencia en la rigidez del chasis y la carrocería del vehículo. Se parte de un modelo existente, se parametriza y simula. La validación de los resultados se realiza mediante los resultados se realiza mediante los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio.

Los posibles materiales para utilizar en el nuevo chasis propuesto se caracterizan mediante ensayos mecánicos estándar a fin de parametrizarlos para los programas de simulación. El ajuste fino de los valores obtenidos se realiza mediante las pruebas de laboratorio de la carrocería del modelo existente.

1. PRESENTACIÓN

1.1. Ingeniería de Proyecto en Grupo

La *Escuela Universitaria de Ingenieros Técnicos Industriales de Barcelona* (EUETIB) ha apostado en una experiencia piloto en el aprendizaje basado en proyectos y como resultado va a poner en marcha para el curso académico 2004-2005 una nueva intensificación denominada *Ingeniería de Proyecto en Grupo*. Desde todos los ámbitos de la escuela se ha apoyado el reto docente que ha impulsado la asociación *Eco Enginys de l'Escola Industrial* (EEEI). Esta asociación sin ánimo de lucro constituida por un grupo de profesores de la escuela, tiene el objetivo de desarrollar proyectos multidisciplinares en los que los estudiantes puedan fijar y ampliar los conocimientos adquiridos en las distintas asignaturas que conforman sus estudios de ingeniería técnica. El

objetivo fundamental de la EEEI es impulsar que grupos multidisciplinares de estudiantes y profesores desarrollen proyectos reales.

Para poder alcanzar este objetivo es necesario que el proyecto tenga una envergadura para que sea indispensable la participación de estudiantes con perfiles tecnológicos diferentes y a la vez, es importante, que el proyecto disponga de los elementos necesarios para entusiasmar al grupo.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, una competición del mundo del motor reúne estas características, ya que el grupo ha de desarrollar el proyecto de un vehículo que cumpla con unas especificaciones técnicas muy concretas para que pueda participar en la carrera en una fecha determinada. Así, el proyecto que la EEEI ha desarrollado durante el curso 2003-2004 es un prototipo de vehículo de bajo consumo que ha participado en la 20ª edición de la *Shell Eco-Marathon*.

1.2. Sobre la *Shell Eco-Marathon*

La *Shell Eco-Marathon* es una competición anual de ahorro energético organizada por *Shell Global Solutions* desde 1985. Los equipos que compiten en ella son equipos universitarios formados por profesores y estudiantes universitarios o semiprofesionales equipos independientes.

Los participantes han de construir un vehículo que satisfaga los requisitos de seguridad exigidos por la organización y que corra un número de vueltas determinado con la menor cantidad de combustible posible. Los diseños han de considerar aspectos de aerodinámica, resistencia a la rodadura, rendimiento del motor y estrategias de carrera para obtener el mayor rendimiento posible del combustible.



Figura 1.- Cartel de la 20ª edición.

1.3. Nuestra participación en la *Shell Eco-Marathon*

La participación de un equipo de la EUETIB en la 20ª edición de la *Shell Eco-Marathon*, ha permitido a la EEEI promover un aprendizaje práctico y aplicado a un grupo de estudiantes. Cada uno de ellos tenía como responsabilidad llevar

a cabo el diseño, fabricación y montaje de alguna parte del prototipo que debía concursar. Para cada estudiante esto constituye el trabajo que ha de realizar para poder presentar su proyecto final de carrera, pero el proyecto es mucho más que eso, el proyecto obliga a los estudiantes a no trabajar únicamente en su área y es necesario que trabajen de forma conjunta con otros componentes del equipo ya que el resultado final es único por lo que las partes no son independientes y ha den formar un conjunto armónico, donde la mayoría de decisiones afectan a varios estudiantes por lo que la solución ha de estar enmarcada en estrategias globales y no en individualismos.

El proyecto de realizar un coche para estudiantes de ingeniería es motivador, pero el hecho de que además exista una competición obliga al equipo a trabajar como tal, impone fechas de entrega muy concretas, se ha den valorar y estudiar todas las vías y soluciones técnicas para sacar el mayor rendimiento a los recursos económicos y humanos del equipo, por lo que se hace indispensable un trabajo en equipo fomentando el consenso y la buena relación. Y evidentemente, el hecho de que el esfuerzo de todo un curso culmine con la realización de un prototipo que pueda competir con otros equipos de todo el mundo en Francia hace que estos estudiantes saquen una experiencia inolvidable de sus estudios de primer ciclo.

2. EL PROYECTO ACTUAL

El proyecto que se ha realizado durante este curso 2003-2004 es la mejora del prototipo del año anterior. Por lo tanto, el objetivo fundamental consistía en introducir todas las mejoras necesarias en el vehículo con el fin de aumentar el número de kilómetros recorridos con un litro de gasolina, en este caso podemos celebrar que el objetivo está cumplido ya que la competición se desarrolló durante los días 15 y 16 de mayo de 2004, y se pasó de 536 km realizados en la 19ª edición a 872 km recorridos durante esta última 20ª edición.

Esta constituye otra gran ventaja de este proyecto, no se trata de un proyecto cerrado sino que cada año permite nuevas soluciones que mejoren la marca anterior. El proyecto engloba una gran cantidad de disciplinas y técnicas que permiten avanzar en distintas líneas de investigación y realizar proyectos tecnológicos que se ajustan a las necesidades industriales actuales bajo un proyecto docente.

3. EL CHASIS

Uno de los proyectos englobados por este prototipo es el concerniente al chasis del coche. La carcasa del mismo juega un papel muy importante en lo referente al ahorro energético por lo que tiene un papel clave en los resultados.

3.1. Antecedentes

La primera participación del equipo EEEI en la *Shell Eco Maraton* tuvo lugar el año pasado, 2003. Para este evento el equipo se fusionó con un equipo catalán (EBIS) liderado por *Pere Ciurans* que ha participado en la carrera durante más de 10 años.

De esta unión surgió el prototipo E20, en el que el equipo de la Escuela Industrial se comprometía a mejorar y estudiar el coche mencionado.



Figura 2.- Prototipo E20, año 2003.

Durante este último año el equipo ha mejorado este prototipo y con él ha participado en la carrera del 2004. Esta nueva versión se le ha llamado Centenari como conmemoración al año en que la EUETIB celebra sus cien años de historia.

3.2. El chasis en el ámbito docente

El hecho de que el equipo dispusiera de un chasis ha permitido que el diseño de un chasis propio se convierta en un reto para la EEEI con el que se pretenden alcanzar diferentes aspectos, tanto docentes y como de investigación, y realizar estudios y simulaciones sobre materiales compuestos.

El fabricar un chasis constituirá un hito para el equipo, ya que se trata de un elemento que tiene un coste importante y que una vez construido no permite prácticamente modificaciones. Bajo esta premisa se ha vertebrado un gran proyecto docente que tiene como objetivo final el diseño y construcción de un chasis autoportante de material composite.

El chasis permite analizar y estudiar muchos aspectos tecnológicos de vanguardia y demandados actualmente por diferentes áreas de la industria. Así el diseño del chasis abarca distintas actuaciones que requieren de la realización de distintos proyectos finales de carrera de estudiantes, estos proyectos relacionados entre sí, obligan a que unos a otros se pasen el testigo de sus resultados y comparen experiencias y conclusiones.

En esta línea, el proyecto referente al chasis conlleva recorrer el camino que se indica con el esquema siguiente:

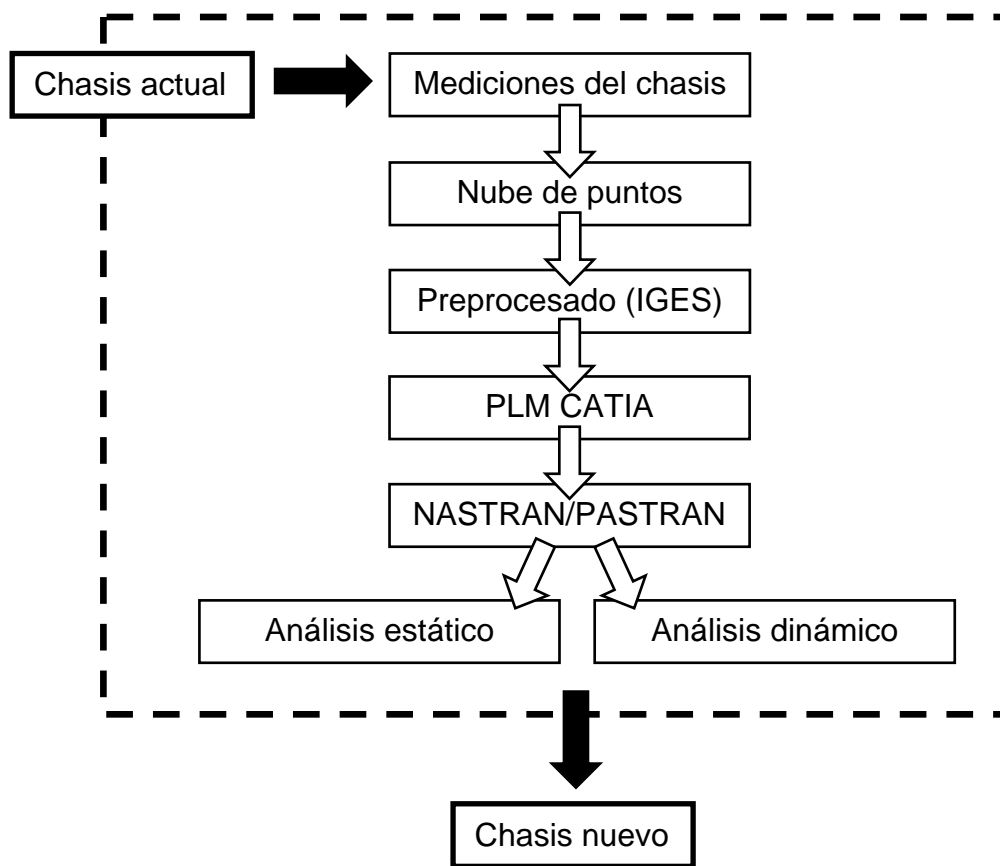


Figura 3.- Pasos del proyecto del chasis.

4. REPRODUCCIÓN Y ESTUDIO DE LA GEOMETRÍA DEL VEHÍCULO CENTENARI

Para realizar el estudio, diseño, simulación y construcción de un nuevo chasis para un futuro prototipo que permita al equipo mejorar la marca alcanzada, se ha decidido empezar el diseño a partir del prototipo actual.

Esta decisión viene promovida por diferentes intereses, la carcasa actual es conocida, existe físicamente por lo que es ideal para realizar estudios sobre ella. El poder analizar el comportamiento de una carcasa real nos permitirá validar los diferentes resultados en las simulaciones que se realicen con posterioridad, y evidentemente el hecho de que se pueda conocer exactamente y de forma real el comportamiento de la misma nos abre las puertas a diversas discusiones de aspectos que deberían considerarse para mejorar la aerodinámica y la rigidez estructural entre otros.

Así, un nuevo chasis pasa irremediabilmente por un estudio en profundidad de la carcasa actual.

Un primer inconveniente que se presenta es el escaso conocimiento de la

misma: no se dispone de un modelo informático de la misma, ni de los planos constructivos ni se conoce con exactitud las propiedades del material con el que fue construida. Así, los primeros proyectos en relación a este nuevo chasis pasan por reconstruir todas estas incógnitas.

Así, la base de la nueva carcasa va a ser el vehículo actual del equipo EEEI, el *Centenari*.

4.1. Geometría del Centenari

Si se pretende simular y calcular el chasis actual, es imprescindible obtener un modelo informático de su geometría. Esta tarea es costosa y requiere de una gran precisión si se desea que el modelo que se obtenga pueda representar al prototipo.

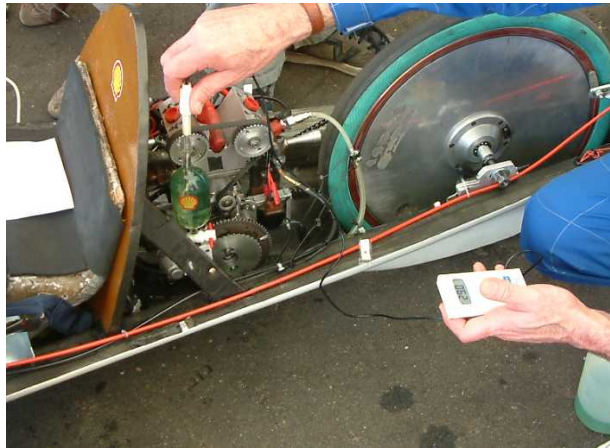


Figura 4.- Detalle del chasis del Centenari.

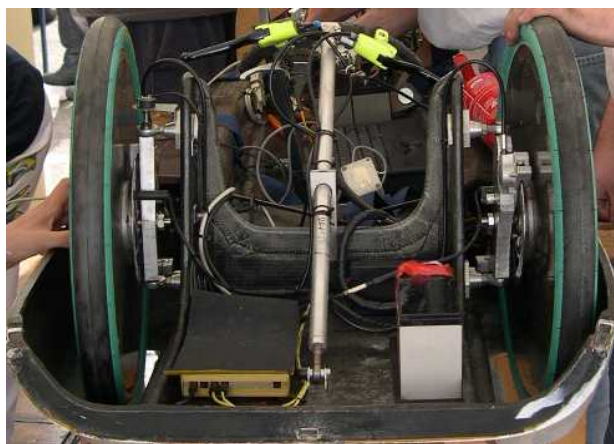


Figura 5.- Detalle del chasis del Centenari.

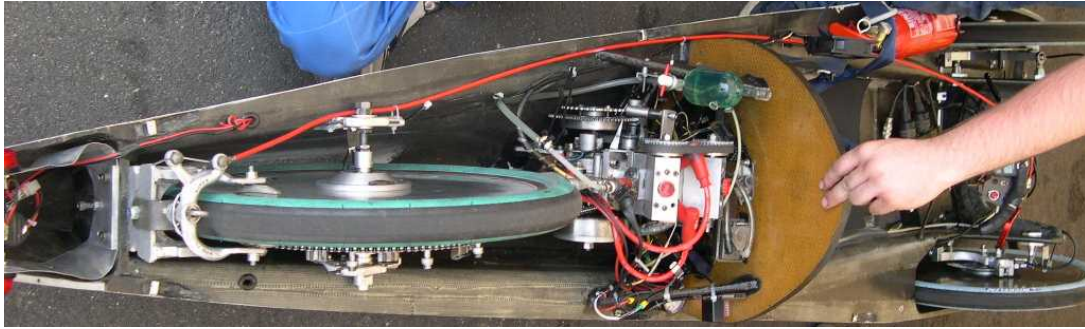


Figura 6.- Detalle del chasis del Centenari.

Para ello, los estudiantes tuvieron que realizar una gran cantidad de mediciones del chasis para obtener así una nube de puntos con los que mediante un programa de dibujo CAD crear la geometría del vehículo Centenari, para sobre éste hacer los estudios de dinámica del vehículo.

La metodología que se ha seguido para obtener los puntos significativos de este chasis, atendiendo a los medios, recursos disponibles y las grandes dimensiones del vehículo, ha sido tomar las medidas con un sistema manual del tipo palpador. Este sistema se basa en avanzar en el eje X del vehículo un diferencial constante de longitud, en el eje Z el método era el mismo y en el eje Y se tomaba la medida mediante un sistema de medición láser.

Para poder desarrollar dicha medición se montó una estructura sólida, para evitar errores debido a movimientos del cuerpo. La base de ésta estaba formada por dos caballetes que se encontraban a una distancia de unos 2 m entre ellos (ya que el vehículo mide aproximadamente 3 m y éste debía reposar encima de la estructura). Los caballetes estaban unidos, por sus extremos superiores. Cada uno de estos caballetes tenía practicado un taladro en el centro de su travesaño superior de modo que nos permitía situar verticalmente en su interior una varilla roscada de paso 1,5 mm. Cada varilla roscada llevaba asociada a su extremo superior un travesaño metálico el cual servía de apoyo a la carrocería del vehículo. Se dispuso de una tuerca con el fin de poder subir y bajar la varilla, junto los soportes, a la altura deseada sabiendo siempre la distancia que desplazábamos el vehículo gracias al paso de rosca.

Una vez montada la estructura de soporte del vehículo se procedió a montar el soporte del sistema de medición láser, independiente a la estructura de soporte del vehículo. Para ello se utilizó un trespiés guiado con una varilla metálica situada verticalmente en el centro de la base. Se fabricó una pletina de aluminio que sirviera de soporte al láser. A ésta se le practicó un taladro con el fin de unirla a la parte superior de la varilla del trespiés.

Con esto montaje se procedió a la medición. El procedimiento fue sencillo: efectuar un barrido de la mitad del vehículo punto a punto y, aprovechando la simetría del vehículo respecto a su eje longitudinal, se obtuvieron los puntos que definían la superficie del vehículo.

El barrido se realizó avanzando con el soporte del láser por encima de los tabloncillos con un diferencial de longitud de 15 mm conociendo así la componente X. La componente Y la conocíamos gracias al sistema de medición láser que nos proporcionaba la distancia del vehículo al plano de medición. La Z era conocida en función del paso de rosca. Así pues, lo que se hizo fue empezar por la parte más baja del vehículo tomando todas las X e Y a lo largo de éste y al llegar al final del vehículo se bajaba un cierto valor de Z constante, conocida gracias al paso de rosca, y repetíamos el procedimiento de barrido, consiguiendo así la nube de puntos buscada.

Los valores de esta nube de puntos se transcribieron en una hoja de cálculo. Este archivo sirvió también para referenciar todos los puntos al mismo origen, ya que en el proceso de medición se tuvieron que tomar distintos orígenes ya que algunas zonas del vehículo nos quedaban escondidas detrás de otras, como por ejemplo el capó que queda a la sombra del paso de rueda.

Posteriormente se introdujeron los datos en un software de análisis topográfico que da la posibilidad de pasar directamente del listado de puntos a una nube de puntos con la forma del vehículo. Esta nube, a la vez permitió eliminar puntos defectuosos de nuestra geometría ya que al tomar puntos con un método artesanal aparecen inevitablemente errores de medición.

Con los puntos informatizados se pasó al software de dibujo CAD, en este caso CATIA, ya que es una herramienta muy útil el tratamiento de superficies en tres dimensiones. Así, se ajustó una superficie a estos puntos con la que poder trabajar. Esta geometría se ha de guardar en un formato estándar de intercambio gráfico para poder utilizarla en los diferentes programas de simulación.

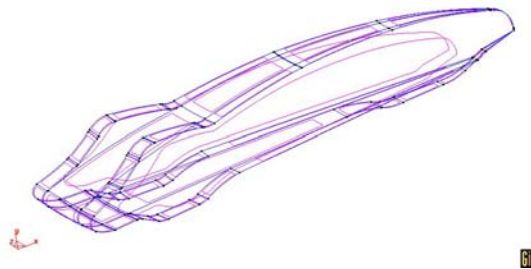


Figura 7.- Primera aproximación de la geometría para la simulación.

Una vez se obtiene la geometría mallada, del coche de bajo consumo, podemos empezar a realizar las diferentes simulaciones sobre la carrocería y el chasis. La geometría que se presenta en las figuras 4 y 5 corresponde al vehículo actual, Centenari, que servirá como primera validación de modelos y primera aproximación.

Partiendo de los resultados obtenidos sobre Centenari, se plantea la necesidad de un nuevo chasis y una nueva carrocería porque la normativa de las

próximas ediciones varía de forma que Centenari en un par de ediciones ya no será capaz de superar las revisiones técnicas de la organización.

5. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO.

El comportamiento dinámico del chasis es fundamental en un buen diseño, así que varios trabajos se van a desarrollar en la línea del estudio de la dinámica vehicular tanto del actual vehículo como el futuro prototipo. Una vez conocido el comportamiento del Centenari se harán los estudios teóricos pertinentes que permitan fijar las especificaciones técnicas que deberá cumplir el futuro coche que participe en las próximas ediciones. Así, que para alcanzar este fin, se van a realizar una serie de acciones futuras que distinguiremos según sean sobre el chasis actual o el prototipo de chasis para el nuevo coche.

5.1. Evaluación del comportamiento dinámico del vehículo del equipo EEEI, el Centenari

Una vez se haya finalizado la generación de la geometría del modelo completo, es decir, tanto la carrocería como los elementos mecánicos se va a proceder al estudio dinámico del vehículo. Cabe destacar la importancia de la precisión que se obtenga en las etapas previas de mejora, ya que hace más fiables los resultados obtenidos.

En primer lugar, se van a realizar una serie de ensayos del vehículo, tanto en laboratorio como en pista. Con los ensayos de laboratorio, se pretende obtener algunos modelos de actuación del vehículo, y se validaran en pista para obtener el comportamiento real del prototipo frente a diferentes situaciones, con esto se pretende tener un conocimiento concreto y preciso del comportamiento de la dinámica vehicular.

A partir de estos datos, se ha de implementar el modelo de cálculo, para poder simular el comportamiento dinámico del vehículo, con herramientas informáticas.

Así, deberemos obtener una buena correlación numérica entre los resultados experimentales y la simulación. Una vez conocido el comportamiento real y simulado. Obteniendo un modelo fiable para iniciar el proceso de optimización del chasis y la carrocería del nuevo prototipo.

Evidentemente, esta simulación representa el modelo que participa en la *Shell Eco-Marathon*, un ejemplo concreto de aplicación; pero permite disponer de un modelo conocido para poder realizar estudios de diferentes entidades y materiales que pueden ser de utilidad en nuevos proyectos. El tener una simulación de estas características nos va a permitir estudiar en profundidad

materiales compuestos de los que no se tiene demasiada información respecto a su comportamiento dinámico.

5.2. Evaluación del comportamiento dinámico del nuevo vehículo del equipo EEEl.

Con los resultados obtenidos mediante el modelo descrito anteriormente se dispone de una herramienta de gran utilidad para la realización de un nuevo diseño de la carrocería.

El disponer de este modelo, permite que conozcamos con exactitud el comportamiento actual del vehículo, es decir nos permite conocer la respuesta frente a las sollicitaciones que se enfrenta el vehículo en competición, la rigidez del mismo y los modos propios de vibración.

Con estos resultados, se ha de realizar un estudio completo para fijar los mínimos requisitos técnicos que serán la base sobre la que se empezará el nuevo diseño y la posterior optimización del mismo.

Es, decir, se fijará si es importante aumentar la rigidez del chasis actual y de qué manera, se deberá determinar en cuánto se va a aumentar la frecuencia de vibración propia respecto al modelo anterior, el nuevo chasis para optimizar los grosores de las paredes que lo forman etc.

Con el modelo disponible, se van a plantear posibles modificaciones en el diseño para alcanzar nuevas y mejores especificaciones técnicas que constituyan la nueva meta en el diseño. Por lo tanto, lo que se pretende es el desarrollo ingenieril y constructivo del nuevo vehículo.

5.3. Materiales *composite*, utilizados para el chasis del Centenari y su predecesor.

Se entiende por *composite* a aquel material compuesto formado por fibras rectas y largas situadas en el interior de una matriz que mantiene a las fibras unidas y distribuye los esfuerzos. Las fibras soportan la mayor parte de las cargas mientras que la matriz se responsabiliza de la tolerancia al daño (golpes) y del comportamiento a fatiga. Una fibra es una multitud de fibras. Por lo tanto, lo que se ve a simple vista se llama *bundle* o *yarn*. Un *bundle* puede tener desde tres mil a doce mil fibras. Las fibras ofrecen sus mejores propiedades cuando trabajan en la dirección de la fibra, es decir, que en un caso ideal deberían alinearse las direcciones de las fibras con la dirección de la fuerza exterior.

Las fibras se sitúan en capas o láminas superpuestas en la dirección del espesor obteniendo estructuras que se llaman laminados. Las láminas nunca se superponen con la misma orientación. Se ha de estudiar a fondo la secuencia de apilado y orientación adecuada para cada caso. La secuencia de

apilado y orientación tiene más importancia incluso que las características físicas de las fibras y de la matriz y es quien va a dar las propiedades finales al laminado. Usando las mismas fibras y matriz y variando secuencia de apilado y orientación se pueden conseguir infinitos comportamientos. Jugando con estos parámetros se pueden conseguir comportamientos radicalmente diferentes en resistencia, rigidez, tolerancia al daño y estabilidad dimensional entre otros.

En el cálculo de piezas de materiales compuestos, la geometría y el material (fibras, matriz, secuencia de apilado y ángulo de las mismas) ha de diseñarse a la vez, interactivamente. Obviamente el cálculo es mucho más complicado que para materiales clásicos. Se ha de conocer a fondo el comportamiento ortótropo de los materiales compuestos para poder sacarles todo su rendimiento. Las fibras se pueden obtener como fibras secas o como preimpregnados. La fabricación con preimpregnados es la que mejores calidades ofrece. A pesar de que para su almacenamiento son necesarias temperaturas muy bajas y los ciclos de procesado son a alta temperatura y presión, es la forma más sencilla de fabricación de materiales compuestos.

El chasis actual se ha fabricado de forma artesanal y se desconocen casi todos los aspectos relativos al proceso de fabricación. Hay que añadir que algunas zonas del vehículo se han reforzado con posterioridad como consecuencia de las deficiencias observadas en la marcha del vehículo. Este aspecto va a dificultar el proceso de simulación en cuanto al suministro de parámetros característicos que requiere todo código.

6. PARTNER TECNOLÓGICO: SENER

La EUETIB tiene establecidos convenios de colaboración con importantes empresas en el ámbito de la ingeniería. Un acuerdo emblemático para la Escuela lo constituye el firmado con SENER www.sener.es en el año 2002. Este acuerdo ha permitido el desarrollo de diferentes actividades conjuntas.

Cabe resaltar especialmente las actividades compartidas de formación en nuevas técnicas y herramientas de simulación. En este contexto y como continuación de la labor en curso, este aspecto de análisis y desarrollo de un nuevo chasis para el vehículo de la *Shell-Eco-Marathon* se ha configurado como un elemento importante que permite el inicio de una nueva etapa en la formación en el ámbito de los nuevos materiales *composites*.

En cualquier proceso de diseño hay que respetar unos criterios de selección como por ejemplo la masa total del sistema, la resistencia estructural, la degradación del material, la resistencia al desgaste, su comportamiento dinámico e incluso su reciclabilidad. Una vez ponderados estos criterios se aborda el ciclo de diseño desde el punto de vista de los materiales: Material-Forma-Proceso.

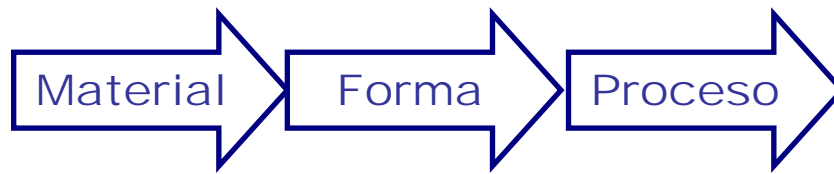


Figura 8.- Ciclo de diseño desde el punto de vista de los materiales.

Hay que prestar especial atención a cada una de estas fases y en especial al proceso de fabricación puesto que el mundo de la fabricación en material *composite* es muy reducido y a veces tiene una componente artesanal considerable. Una ejecución incorrecta del proceso de fabricación puede invalidar cientos de horas de trabajo de diseño y simulación.

Es este sentido, Sener participa del proyecto aportando su dilatada experiencia en el área de desarrollo integral de proyectos desde la concepción inicial hasta la fabricación en planta para colaborar en la formación de los estudiantes en estos aspectos de vanguardia. Para la EUETIB esta colaboración constituye una garantía de éxito.

Conclusiones

Diseñar un prototipo de vehículo se fundamenta en dos pilares básicos uno es el grupo propulsor el otro la estructura autoportante. Este segundo aspecto es que se pretende abordar desde la ortodoxia en ingeniería.

En realidad, resulta bastante sencillo fabricar cualquier forma con un material *composite*, buena prueba de ello se encuentra en la infinidad de pequeños talleres que fabrican todo tipo de formas desde cubiertas hasta planchas de surf.

El verdadero reto consiste en fabricar esa misma forma atendiendo a unos criterios de ingeniería prefijados con anterioridad al proceso de fabricación. Un segundo aspecto a considerar es la caracterización de los materiales. Los aceros, aluminios y plásticos tienen una larga historia que ha permitido conocer íntimamente todas y cada una de sus propiedades e incluso los procesos de fabricación están extensamente experimentados. Este no es el caso, los materiales *composites* son relativamente recientes y como la mayoría de avances tecnológicos procede del ámbito de la aviación militar donde se usan con profusión. Son unas pocas corporaciones en el mundo las que dominan íntimamente los procesos de fabricación con estos materiales. De igual forma que ocurrió con los derivados del petróleo –materiales plásticos- hace tres o cuatro décadas con este tipo de materiales sucederá igual serán de uso común cuando los ingenieros que hoy finalizan su formación alcancen su madurez productiva.

Referencias

- [1] <http://www.shelleco-marathon.com/>
- [2] <http://www.upc.es/info/eeei/>
- [3] <http://www-1.ibm.com/solutions/plm/>
- [4] <http://www.mscsoftware.com/>
- [5] www.sener.es