

---

# Diseño de un Longboard de alto rendimiento

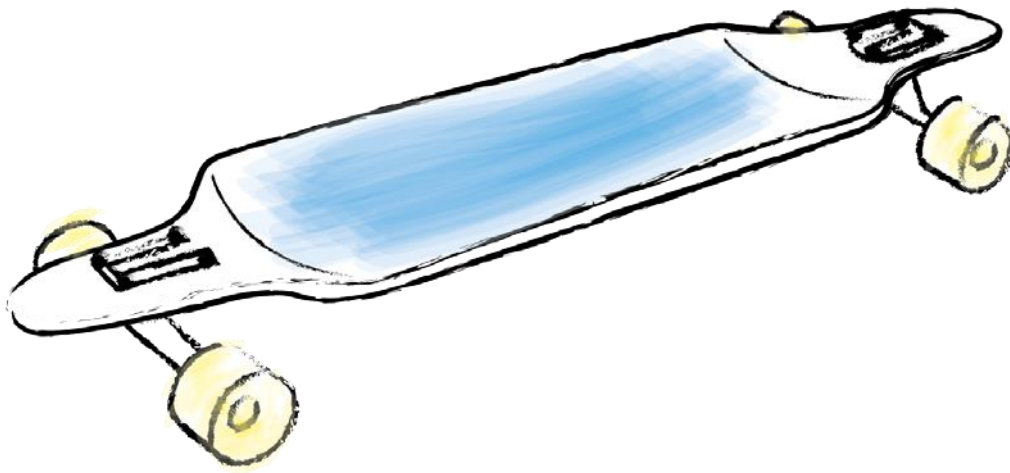
---

*Claes Fredriksson, Granta Design*

*300 Rustat House, 62 Clifton Road, Cambridge, CB1 7EG, UK Benjamin Hornblow, FORCE  
Technology, Park Allé 345, 2605 Brøndby, Denmark*

*First published October 2016*

*© 2016 Granta Design Limited*



## Resumen

Granta Design desarrolla herramientas que se utilizan para la selección avanzada de materiales en la industria. CES EduPack es la versión educativa, que está específicamente diseñada para guiar y mostrar los pasos del proceso de toma de decisiones, con el propósito de enseñar y formar. Ayuda a los estudiantes a entender un enfoque racional y sistemático, de valor incalculable para la ingeniería y el diseño. Nuestros casos prácticos industriales avanzados, conectados a productos reales, promueven la comprensión y motivan a los estudiantes. Aquí nos centramos en el desarrollo y la evaluación comparativa de un panel tipo sándwich de doble curvado de materiales compuestos para mejorar el rendimiento de un longboard, un tipo de monopatín.

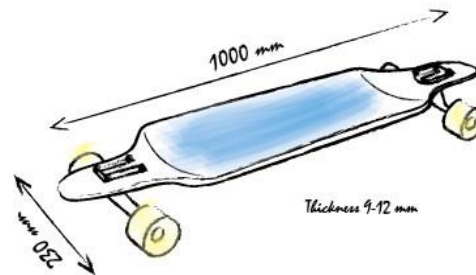
## Contenido

1. ¿Cuál es el alcance? .....	2
2. Cómo abordar el problema .....	2
3. Cómo utilizar CES EduPack para realizar la selección de materiales .....	3
4. Amortiguamiento .....	5
5. Resultados y control de realidad.....	6
6. ¿Qué aporta CES EduPack en el proceso de aprendizaje? .....	8
7. Referencias .....	8

## 1. ¿Cuál es el alcance?

Cuando se desarrolla un nuevo producto, es difícil asegurar que contamos con los mejores materiales para esa aplicación, pero cuando introducimos el concepto de diseñar las variables para fabricar un material compuesto la complejidad alcanza un nuevo nivel.

Sin embargo, ser capaz de considerar las opciones desde las etapas iniciales de diseño nos puede permitir conseguir grandes mejoras en el rendimiento, reducción de masa y coste o aspectos medioambientales. El desafío es determinar qué materiales usar y cómo combinarlos estructuralmente de modo que podamos maximizar los beneficios.



Un longboard es un tipo de monopatín diseñado para las carreras de descenso y slalom, pero también para transportarse. Como es más largo que un monopatín normal y tiene ruedas más grandes, nos permite alcanzar mayores velocidades. Su mayor peso y volumen les hace menos apropiados para trucos de skate, pero esto contribuye a su estabilidad y ofrece un movimiento fluido, ya que proporciona más impulso.

Las tablas de los longboards se fabrican normalmente con entre 2 y 11 capas de madera contrachapada, de unos 2 mm de espesor cada una. Normalmente el contrachapado se compone por ejemplo de madera de abedul, bambú, arce o roble. Los longboards están comercialmente disponibles en una gran variedad de formas y tamaños. Cada uno tiene sus ventajas y desventajas, dependiendo de la técnica o las preferencias personales del patinador/a.

Las tablas se pueden conformar de tal manera que se inclinen hacia arriba o hacia abajo a lo largo de la longitud de la misma. También pueden ser de doble curvatura; cóncavas en la dirección de la anchura y convexas en la longitud. Igualmente, algunos tableros se diseñan para ser flexibles, por lo general destinados a bajas velocidades, porque al ir más rápido una tabla flexible puede tener cierta flexión torsional que es una de las causas de oscilación de velocidad. La fibra de vidrio se utiliza en muchos de los nuevos tableros flexibles, ya que es ligera como la fibra de carbono, pero más flexible.

En este caso práctico hemos investigado la elaboración de una estructura por capas para una tabla de doble curvatura de un longboard usando CES EduPack. Esto se basa en el trabajo realizado por *FORCE Technology*, un instituto para el desarrollo de compuestos industriales en Dinamarca [1]. Describe el proceso de comparación de materiales, simulación de materiales compuestos con la herramienta Synthesizer y posteriormente se usan estos registros creados para construir una estructura tipo Sándwich con la misma herramienta. El procedimiento se describe en detalle y los resultados se comparan con los materiales de las estructuras reales utilizados en los longboards comerciales.

## 2. Cómo abordar el problema

Comenzaremos la investigación examinando los diferentes materiales utilizados para las tablas de longboard y determinaremos qué propiedades son claves para su rendimiento. La resistencia será, por supuesto, uno de los parámetros cruciales en el sentido de que la cubierta debe ser lo suficientemente robusta. Sin embargo, no es esta propiedad la que limita el rendimiento. Al igual que en otros equipos utilizados para deportes y carreras (esquí, raquetas, coches...), se trata de un diseño limitado por la rigidez (para evitar la deflexión de la tabla). En la imagen y las gráficas siguientes se muestran algunos tipos comunes de materiales para la tabla. Nos centraremos en el rendimiento mecánico, por lo que el coste no se considera en este caso práctico.

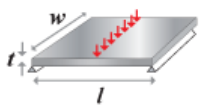
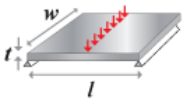


Desde la izquierda: Vemos una tabla hecha con madera de arce, normalmente tiene entre 5-8 capas cruzadas y suelen ser las más económicas. La siguiente, con bambú unidireccional y a la derecha del todo una ligera estructura tipo sándwich que consiste en capas de fibra de carbono, madera de arce y fibras de vidrio. El coste de esta última es superior a los 100 USD. A pesar de que la masa de la tabla proporciona estabilidad, no contribuye a alcanzar mayores velocidades cuesta abajo, debido a la elevada inercia. La forma de promover mayores velocidades es reducir la fricción y la resistencia al aire. Por lo tanto, lo normal es tratar de minimizar la masa cuando buscamos un material para la tabla. Las propiedades de amortiguación del material son otras de las propiedades importantes que contribuyen a la comodidad y a la seguridad del viaje. Sería ideal poder dar con un material que minimizase las vibraciones, ya que son perturbadoras. Por lo tanto, nuestros objetivos serán minimizar la masa y maximizar el amortiguamiento.

### 3. Cómo utilizar CES EduPack para realizar la selección de materiales

Podríamos considerar la tabla del longboard como un panel sometido a flexión. La tabla de índices de materiales disponible en el botón de **Ayuda** en CES EduPack nos dice que debemos maximizar la raíz cubica del módulo a flexión,  $E_f$ , dividido por la densidad,  $\rho$ . Con el fin de minimizar las vibraciones usaremos la misma ecuación multiplicada por el coeficiente de pérdida mecánica (amortiguamiento),  $\eta$ . Un resumen (a modo de traducción) de los requerimientos de diseño se muestra en la página 4 [2].

#### Stiffness-limited design at minimum mass

FUNCTION AND CONSTRAINTS <sup>1</sup>		MAXIMIZE <sup>2</sup>	MINIMIZE <sup>2</sup>	
Panel in bending		length, width fixed; thickness free	$E_f^{1/3} / \rho$	$\rho / E_f^{1/3}$
Panel in bending		optimize for resonant frequency; length, width fixed; thickness free	$E_f^{1/3} / \rho$	$\rho / E_f^{1/3}$
		optimize for vibration amplitude; length, width fixed; thickness free	$\eta E_f^{1/3} / \rho$	$\rho / \eta E_f^{1/3}$

Partimos de casi 4000 materiales ingenieriles disponibles en el Nivel 3 de CES EduPack para realizar la selección. Por supuesto no todos ellos son candidatos para la tabla de un longboard. Podemos imponer restricciones y limitar el número de materiales. Estas restricciones se basan principalmente en las tablas ya existentes.

## Función:

Tenemos un **panel sometido a flexión** y limitado por la **rigidez**. Las variables libres son el espesor de la tabla y la combinación de materiales.

## Restricciones:

Estas limitaciones están cogidas de las tablas existentes:

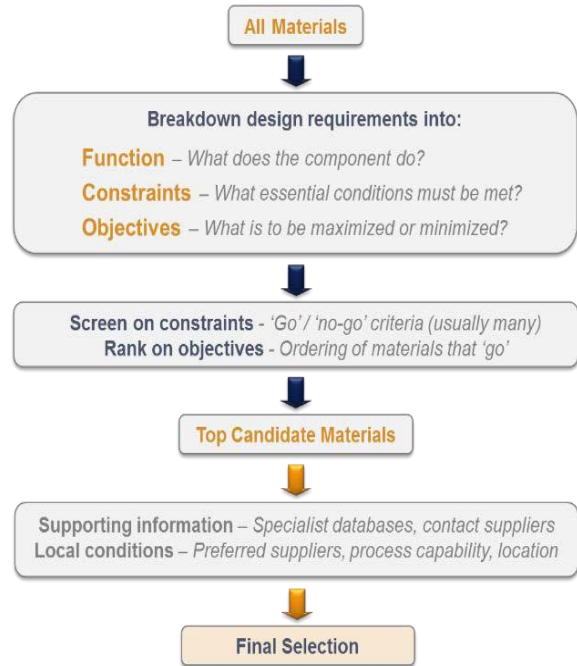
- *Temperatura en servicio: -20 °C a +60 °C*
- *Densidad: < 3000 kg/m<sup>3</sup>*
- *Módulo de Young: > 1 MPa*
- *Resistente a lluvia y agua salada:*

**Limited/Acceptable/Excellent**

## Objetivos:

La tabla de índices de rendimiento está en la opción **Ayuda**. Para **minimizar la masa** en un diseño limitado por la rigidez y por la **vibración**, necesitamos maximizar:

$$M1 = E^{1/3} / \rho \text{ (masa) y } M2 = \eta * E^{1/3} / \rho \text{ (vibración).}$$



CES EduPack provee los índices de rendimiento específicos para los diseños limitados por vibración.

Performance Indices for Materials				
Click on the buttons to view a table of relevant performance indices.				
	Mass	Cost	Embodied Energy	CO <sub>2</sub> Footprint
Stiffness-limited design	kg	\$	H <sub>m</sub>	CO <sub>2</sub>
Strength-limited design	kg	\$	H <sub>m</sub>	CO <sub>2</sub>

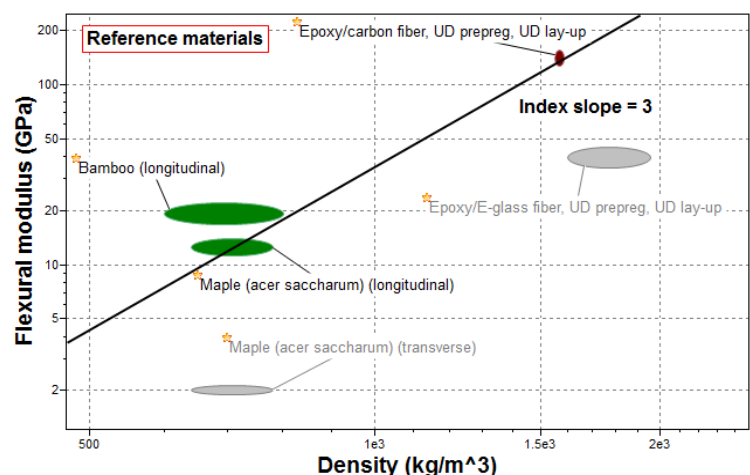
Vibration-limited design	Damage-tolerant design	Abrasion-resistant design	Thermo-mechanical design
Electro-mechanical design	Vapor barrier design	Strength-limited design to optimize performance	

Un enfoque común para mejorar los productos existentes en la industria es considerar los materiales que se usan en la actualidad como punto de partida, tales como los longboards mostrados en la página 3. Estos se pueden incluir como referencia a modo de subconjunto personalizado, aquí los marcaremos como **Favoritos**.

El procedimiento consistiría en comparar los nuevos materiales y combinaciones con los materiales ya existentes previamente. En este caso práctico seguiremos este camino y probaremos configuraciones estructurales de algunos materiales comunes, usando la herramienta *Synthesizer* para guiar nuestro desarrollo.

Para evaluar el rendimiento y tener una visión general, es útil representar en un gráfico el subconjunto personalizado generado con los materiales utilizados comúnmente para las tablas.

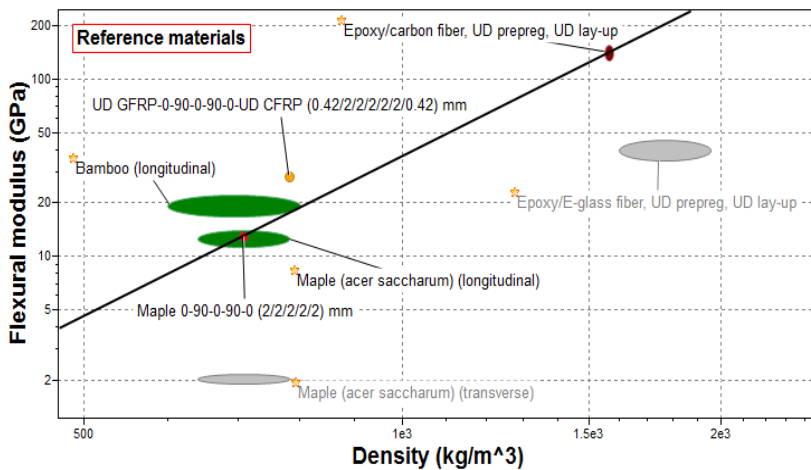
Creando una línea de pendiente 3, correspondiente al exponente 1/3 que está en las expresiones de los índices. Podemos ver que el bambú es el de mayor rendimiento, incluso superior a los compuestos de epoxi reforzados con fibra de carbono (CFRP), y que el arce (longitudinal) también es adecuado. La fibra de vidrio reforzada con epoxi (GFRP), tiene el menor rendimiento de esta comparación.



¿Cuál sería el efecto de laminar el arce, o introducirlo entre capas de material compuesto? Esto podemos investigarlo a través del *Synthesizer*, disponible en la base de datos *Sustainability* de CES EduPack.



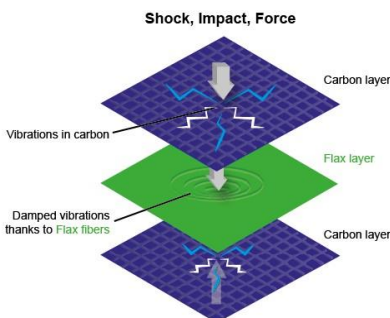
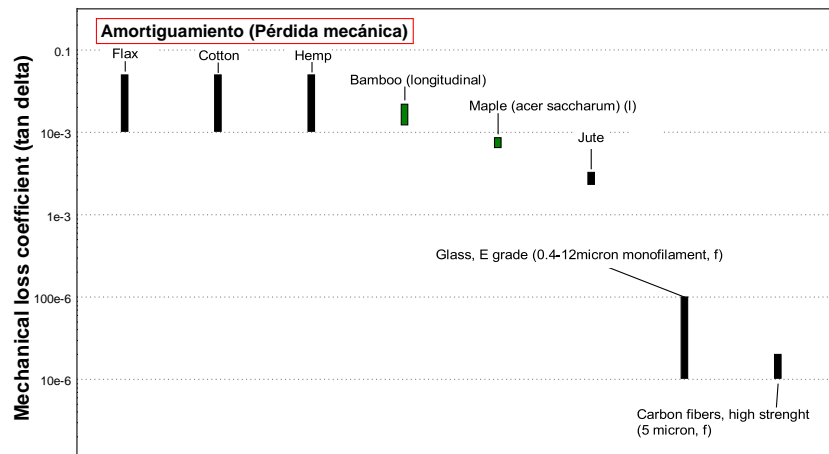
Podemos responder ambas cuestiones usando el modelo multicapa del Synthesizer. Creamos por un lado capas alternas de arce longitudinales y transversales de 2 mm de espesor en un modelo de 5 capas y por otro, un modelo de 7 capas con la misma estructura tipo sándwich con capas de 0.42 mm de *prepregs* de GFRP y CFRP unidireccionales (UD). Los resultados se muestran más abajo.



Parece que ni la laminación ni la estructura tipo sándwich de arce en multicapas entre caras de FRP mejoran el índice del material comparado con el bambú. Para superar el rendimiento del bambú en la tabla del monopatín es necesario aumentar la rigidez a flexión y/o reducir la densidad. Cualquier estructura propuesta se puede probar con el Synthesizer antes de fabricar un prototipo. Esto puede hacerse en combinación con las propiedades de amortiguación mejoradas.

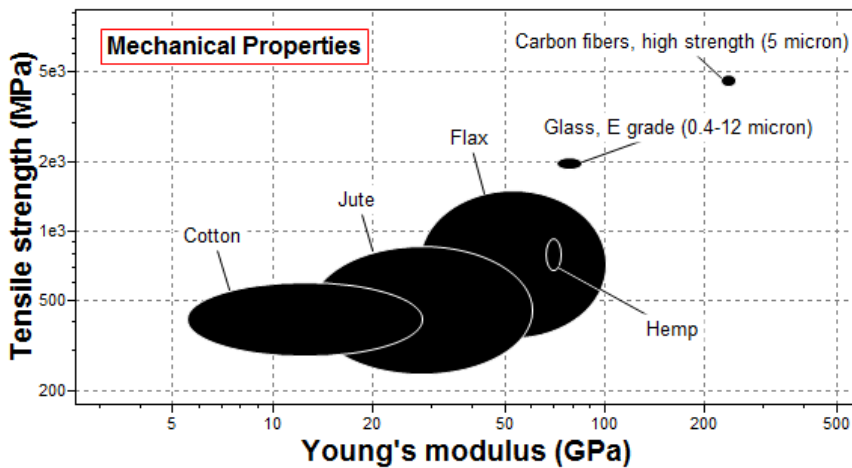
#### 4. Amortiguamiento

Si observamos el segundo objetivo, asociado con la amortiguación vibracional del longboard, vemos que algunas fibras naturales son bastante superiores a CFRP o GFRP, en cuanto a su coeficiente de pérdida mecánica. El cáñamo o el lino son fibras fácilmente disponibles que pueden utilizarse como refuerzos en compuestos y ayudan a reducir las vibraciones. Representando el segundo objetivo, M2, el resultado es el mismo.



*Lineo* [3] comercializa un producto basado en esta idea. Si las fibras naturales se integran en una estructura tipo sándwich entre capas de CFRP tanto por arriba como por debajo de la tabla, aumentarán de forma notable el módulo a flexión y el amortiguamiento. El motivo para elegir fibras de lino es que muestran un excelente rendimiento en amortiguación al igual que buenas propiedades mecánicas tal y como se muestra más abajo. Este distribuidor ofrece hasta 50% de lino en una resina epoxi: FlaxTape™ y FlaxPreg™ [3].





Más abajo se muestran la resistencia a tracción y la rigidez de algunas de las fibras más comunes. Respecto a la rigidez, las fibras naturales compiten con la fibra de vidrio, pero no con la de carbono. El lino es mejor que el cáñamo tanto en rigidez como en resistencia. El Synthesizer se puede usar para estimar las propiedades de compuestos basados en fibras de lino unidireccionales en una matriz de epoxi.

Hemos usado el modelo unidireccional de límites simples del *Synthesizer* para generar dos registros con 45-50% de lino en una matriz epoxi. Podemos verlos en el gráfico de la siguiente sección. Usamos el compuesto sintetizado para el 50% (mayor  $E_f$  y comercialmente disponible) en un nuevo modelo de 7 capas. Para reducir la densidad, se utiliza una espuma de PET rígido como material para el núcleo. Se pueden ver los detalles en las Notas de la derecha, Para fines educativos es importante poder discutir las limitaciones de los modelos. Todas las suposiciones y ecuaciones se pueden encontrar a través del botón **AYUDA > Tools**.

**Notes**

**Warning** ⓘ

The accuracy of the multilayer model calculations varies between properties. In particular, caution should be exercised when making decisions based on: Price, flexural strength and through-thickness thermal conductivity. In these cases refer to the model assumptions.

**Notes**

**Source records**

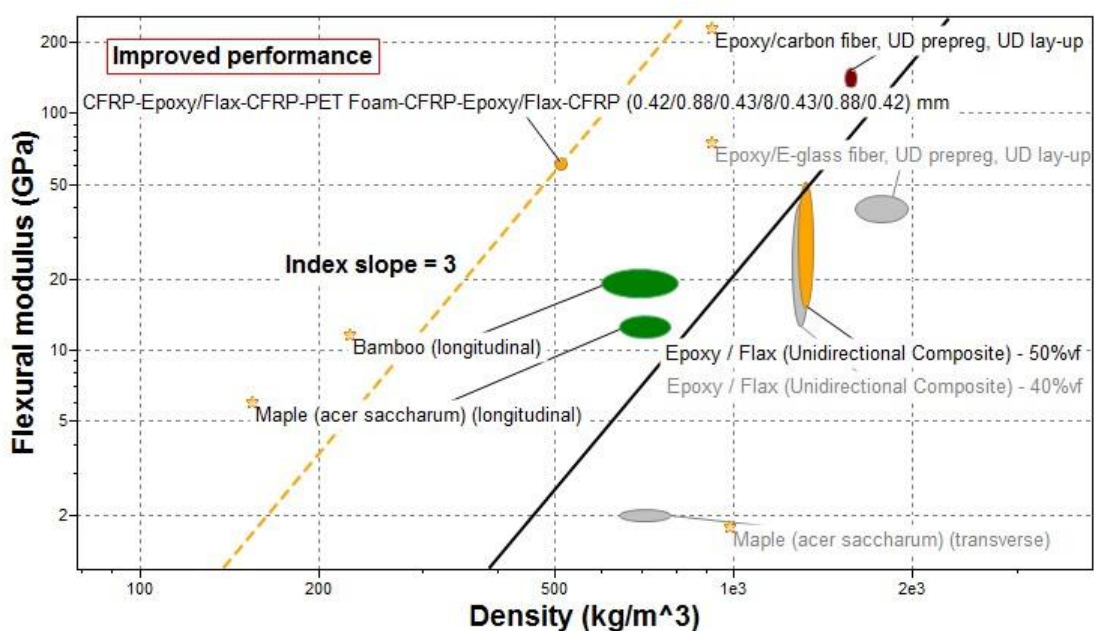
- Layer 7 (top) = Epoxy/carbon fiber, UD prepreg, UD lay-up
- Layer 6 = Epoxy / Flax (Unidirectional Composite) - 50%vf
- Layer 5 = Epoxy/carbon fiber, UD prepreg, UD lay-up
- Layer 4 = Polyethylene terephthalate foam (closed cell, 0.108)
- Layer 3 = Epoxy/carbon fiber, UD prepreg, UD lay-up
- Layer 2 = Epoxy / Flax (Unidirectional Composite) - 50%vf
- Layer 1 (bottom) = Epoxy/carbon fiber, UD prepreg, UD lay-up

**Parameters**

- Thickness layer 7 (top) = 0.42 mm
- Thickness layer 6 = 0.88 mm
- Thickness layer 5 = 0.43 mm
- Thickness layer 4 = 8 mm
- Thickness layer 3 = 0.43 mm
- Thickness layer 2 = 0.88 mm
- Thickness layer 1 (bottom) = 0.42 mm

Model: Multi-layer Materials, 7-layer  
Date of analysis: 19 October 2016

## 5. Resultados y control de realidad



Los resultados mostrados en el gráfico con la estructura propuesta de 7 capas con espuma de PET en el núcleo y los compuestos tipo sándwich en las caras, proporcionan una mejora significativa en el rendimiento. Sería preciso realizar cálculos más allá tipo EF (Elementos Finitos), pero, la investigación realizada con el Synthesizer nos proporciona una guía que nos permite reducir tiempo, coste y esfuerzo en el desarrollo.

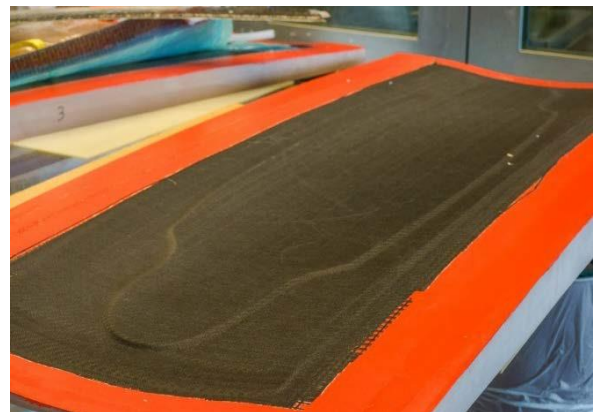
Este caso práctico también nos muestra como un ingeniero/a puede usar la información y los gráficos de CES EduPack para tomar decisiones sobre cómo mejorar el diseño de la tabla de un longboard. Nos sirve como un ejemplo realista para los estudiantes, ya que se ha utilizado por un instituto en Dinamarca, *FORCE*, que desarrolla materiales compuestos para mejorar el rendimiento. *FORCE Technology* ha fabricado y ensayado prototipos muy similares a la combinación de CFRP/lino como materiales para las caras alrededor de una espuma rígida de PET, que incluso se han considerado para el desarrollo comercial. Abajo está disponible alguna información de los ensayos (imágenes suministradas por Benjamin Hornblow, *FORCE Technologies*).

Longboard	Espesor [mm]	Peso [g]	Deflexión, Flexión en 3 puntos [mm]
Referencia	9.8	1685	14
Panel sándwich de carbono / lino	11	1180	15

**Diferencia**

505 (30% de reducción de peso)

A continuación, se muestra el proceso de manufactura de *FORCE Technology* de un longboard con las caras de CFRP/lino y el núcleo de espuma de PET. Arriba se puede ver la espuma de PET en la forma predefinida, seguido del curado. Abajo podemos ver la sección transversal del prototipo final y un usuario probándolo.



## 6. ¿Qué aporta CES EduPack en el proceso de aprendizaje?

CES EduPack genera resultados cuantitativos y altamente visuales de forma interactiva, lo cual, combinado con la experiencia del docente puede ayudar a enseñar sobre el proceso de diseño y cómo tomar buenas decisiones en lo que a los materiales se refiere.

CES EduPack sugiere las siguientes conclusiones:

- CES EduPack proporciona los índices de rendimiento, en este caso para un panel sometido a flexión y restringido por la rigidez, lo cual permite una visión general de las propiedades de los materiales existentes. Esto proporciona un buen punto de partida para el desarrollo del producto y una dirección clara para las posibles mejoras.
- Las tablas disponibles de arce o bambú son difíciles de mejorar. Las estructuras multicapas o tipo sándwich con finas capas o compuestos reforzados con fibras no mejoran el rendimiento.
- Se podría explorar la idea de un compuesto epoxi/lino, comercialmente disponible, generando primero un registro para un material compuesto de límites simples y luego utilizando esto en un modelo de 7 capas, todo ello en la herramienta Synthesizer con un núcleo de espuma PET en lugar de madera. Esta alternativa mejora significativamente los resultados.
- Se ha podido replicar con CES EduPack el camino llevado a cabo por *FORCE Technology* en Dinamarca para desarrollar y fabricar un prototipo de Longboard en sus laboratorios. Las pruebas finales muestran como una estructura tipo sándwich con caras de un compuesto con epoxi/lino y núcleo de espuma de PET consiguen un aligeramiento del 30% en peso y una experiencia de patinaje mejorada.



## 7. Referencias

1. Benjamin Hornblow, Composites Specialist, FORCE Technology, [www.forcetechnology.com](http://www.forcetechnology.com)
2. La metodología se puede encontrar en libros como: Ashby, M.F. (2005) "Materials Selection in Mechanical Design", 3rd edition, Butterworth Heinemann, Oxford, UK. ISBN0-7506-6168-2.
3. Página principal y descripción del producto: [www.lineo.eu](http://www.lineo.eu)