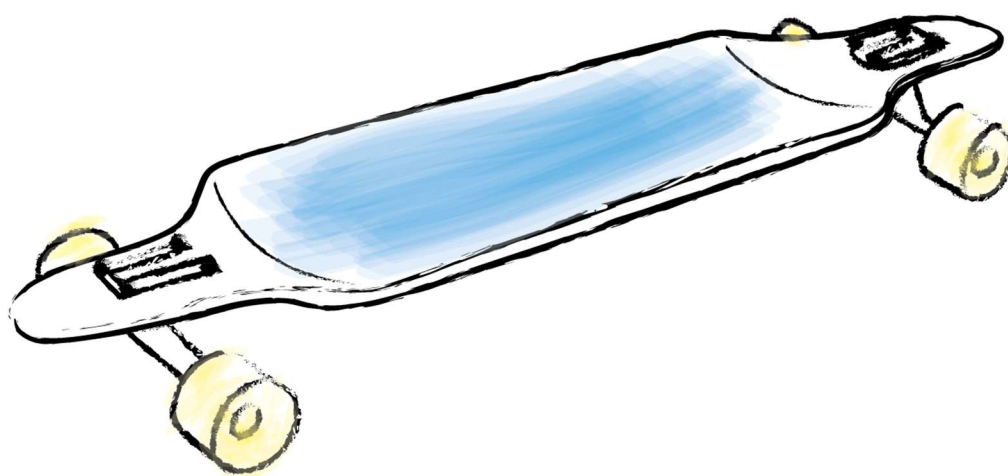


# Projeto de Longboard de Alta Performance

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

*Publicado em Outubro de 2016*  
*© 2016 Granta Design Limited*



## Resumo

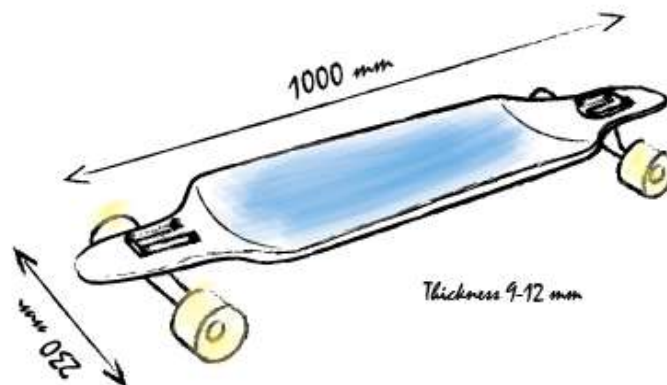
A Granta Design desenvolve um software que é usado para seleção avançada de materiais na indústria. O CES EduPack é a versão educacional especificamente projetada para guiar e mostrar os passos do processo de decisão com propósito de ensinar e treinar futuros engenheiros e especialistas. Isso ajuda os estudantes a entender a abordagem racional e sistemática, a qual é inestimável para a engenharia e projeto. Nossos estudos de caso industriais avançados, conectados a um produto real, promovem a compreensão e estimulam os estudantes. Nosso foco aqui está no desenvolvimento e no *benchmarking* de um painel sanduíche duplo feito de materiais compósitos para melhorar o desempenho de um tipo de skate chamado de longboard.

## Conteúdo

|                                                                       |   |
|-----------------------------------------------------------------------|---|
| 1. Qual é o Escopo?.....                                              | 2 |
| 2. Como Resolver o Problema ? .....                                   | 2 |
| 3. Como Usar o CES EduPack para Realizar a Seleção de Materiais ..... | 3 |
| 4. Amortecimento .....                                                | 5 |
| 5. Resultado e Verificação da Realidade .....                         | 6 |
| 6. O Que o CES EduPack nos Ajuda a Compreender? .....                 | 8 |
| 7. Referências .....                                                  | 8 |

## 1. Qual é o Escopo?

Quando se desenvolve produtos, é difícil garantir que terá os melhores materiais para a sua aplicação, mas quando se trata de analisar as variáveis de um compósito, a complexidade atinge um novo patamar. No entanto, se for possível levar em consideração as opções no início do projeto, você pode alcançar grandes melhorias em desempenho, redução de peso e credenciais ecológicas. O desafio é determinar quais materiais usar e como combiná-los estruturalmente para maximizar os benefícios.



Um longboard é um tipo de skate projetado para competições de *downhill* (grandes descidas) e *slalom* (com obstáculos), mas também para transporte simples. Por ser mais longo e ter rodas maiores que um skate normal, ele alcança maiores velocidades. Seu maior peso e volume fazem dele menos adequado para manobras mas contribuem para a estabilidade e um movimento fluido, provendo mais momento.

As tábuas (*shapes*) dos skates longboards são feitas tipicamente de compensado de madeira variando de 2 a 11 camadas, cada uma com geralmente 2 mm (0,079 polegadas) de espessura. Estas são compostas de, por exemplo, madeiras de bétula, bambu, bordo ou carvalho. Longboards estão comercialmente disponíveis em uma variedade de formas e tamanhos. Cada uma tem suas vantagens e desvantagens, dependendo da técnica ou das preferências pessoais do skatista.

As tábuas podem ser moldadas de tal maneira que se curvem para cima ou para baixo ao longo do comprimento da tábua. Elas também podem ter curvatura dupla; côncavas na direção da largura e convexas no comprimento. Além disso, algumas tábuas são projetadas para serem flexíveis, geralmente destinadas a velocidades mais baixas pois, em velocidades maiores, uma tábua flexível pode sofrer flexão torsional, o que é uma das causas das oscilações de velocidade. A fibra de vidro é usada em muitas das novas tábuas flexíveis, pois ela é tão leve quanto a fibra de carbono, mas mais flexível.

Neste estudo de caso, nós investigamos o desenvolvimento da estrutura em camadas da tábua com curvatura dupla de um longboard usando o software CES EduPack. Esse estudo é baseado no trabalho feito pela FORCE Technology, um instituto para o desenvolvimento da indústria de compósitos na Dinamarca [1]. Ele descreve o processo de comparação dos materiais, definindo os materiais compósitos na ferramenta *Synthesizer* e então usando os registros desses materiais compósitos para construir uma estrutura em sanduíche competitiva na mesma ferramenta. O procedimento é descrito em detalhes e os resultados são comparados com os materiais estruturais usados atualmente em longboards comerciais.

## 2. Como Resolver o Problema

Nós começaremos nossa investigação olhando para diferentes materiais usados para tábuas de longboard e determinaremos quais são as propriedades-chaves para o desempenho. Resistência será, é claro, um dos parâmetros cruciais, no sentido que a tábua deve ser suficientemente forte. Entretanto, esta não é a propriedade que limita o desempenho. Ao contrário, assim como em outros equipamentos usados para esportes e corridas (esquis, raquetes, carros, etc), a tábua é um projeto limitado pela rigidez (para evitar a sua deflexão). Na figura abaixo, alguns tipos comuns de materiais para a tábua são mostrados. Nós nos concentraremos no desempenho mecânico, logo o custo não será levado em consideração neste estudo de caso.

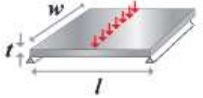
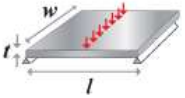


A partir da esquerda, a tábua de Bordo é mostrada. Estas têm tipicamente de 5-8 camadas cruzadas e estão na parte inferior da faixa de preços. Na sequência, a tábua de bambu unidirecional é mostrada e à direita uma tábua de painel sanduíche de baixo peso, composta de camadas de fibra de carbono/bordo/fibra de vidro. Estas custam tipicamente mais de 100 dólares. Enquanto a massa da tábua proporciona estabilidade, ela não contribui para se atingir maiores velocidades nas descidas, devido a uma maior inércia. Ao contrário, é sua baixa fricção e resistência do ar que promovem a velocidade. Na subida, por outro lado, a massa definitivamente contribui para menores velocidades. É natural procurar minimizar a massa durante a seleção da tábua. Outro fator que contribui para o conforto e segurança do passeio são as propriedades de amortecimento do material. É desejável encontrar um material que minimize as vibrações pois elas são perturbadoras. Os objetivos serão, portanto, minimizar a massa e maximizar o amortecimento.

### 3. Como Usar o CES EduPack para Executar a Seleção de Materiais

A tábua do longboard é precisamente um painel sob flexão. As tabelas de índices de méritos disponíveis pelo botão **Help** no EduPack nos dizem para maximizar a raiz cúbica do módulo de flexão,  $E_f$ , dividido pela densidade,  $\rho$ . De maneira a minimizar as vibrações, a mesma expressão multiplicada pelo coeficiente de perda mecânica (amortecimento),  $\eta$ , deveria ser maximizada (confira abaixo). Um resumo (tradução) dos requisitos de projeto é dado na 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 | $\eta E_f^{1/3} / \rho$ | $\rho / \eta E_f^{1/3}$ |

As bases da seleção são os dados registrados para quase 4000 materiais de engenharia disponíveis no nível 3 do CES EduPack. Estes não são todos candidatos para a tábua de longboard. É possível inserir restrições, para limitar o número de materiais. Estas restrições são baseadas em grande parte nas tábuas de longboard existentes acima.

## Função:

A aplicação de engenharia aqui é um **painel sob flexão** limitado pela **rigidez** (nós não queremos que a tábua flexione demais). As variáveis de projeto livres são a espessura do painel e a combinação de materiais.

## Restrições:

Estas restrições são baseadas em grande parte nas tábuas existentes:

- *Temperatura de serviço*: **-20°C to +60°C**
- *Densidade*: **< 3000 kg/m<sup>3</sup>**
- *Módulo de Young*: **> 1 MPa**
- *Resistência a chuva e a água salgada*:  
**Limitada/Aceitável/Excelente**

## Objetivos:

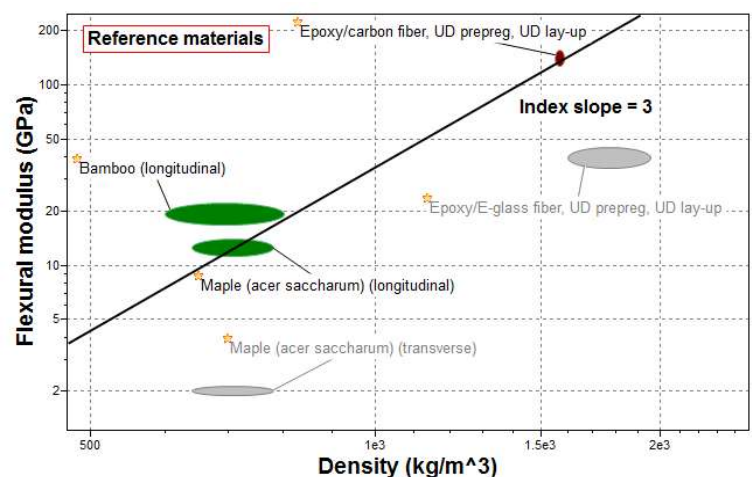
Uma tabela de índices de desempenho usuais pode ser encontrada clicando no botão **Help** que se localiza na barra de ferramentas principal do software. Para **baixa massa** em um projeto limitado pela rigidez e para um projeto **limitado pela vibração**, nós precisamos maximizar  $M1 = E^{1/3} / \rho$  (massa) and  $M2 = \eta * E^{1/3} / \rho$  (amortecimento).

Para um projeto limitado pela vibração o EduPack fornece os índices de desempenho em um botão separado, como visto abaixo.

| 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                       |      |      |                 |                           |

De maneira a julgar o desempenho e ter uma visão geral, é útil plotar o conjunto de dados personalizados gerados pelos materiais envolvidos nas tábuas de referência acima. Usando uma linha de índice com inclinação 3, correspondente ao expoente 1/3 das expressões de índices de mérito, pode se ver que o bambu é o material com melhor desempenho, superando até mesmo os compósitos poliméricos de epóxi reforçados com fibra de carbono (PRFC) e com bordo (longitudinal). Os compósitos poliméricos de epóxi reforçado com fibra de vidro (PRFV) são os com menor classificação nessa comparação.

Uma abordagem usual para o desenvolvimento de produtos na indústria, para melhorar os produtos existentes, é considerar os materiais atualmente utilizados, como os que são mostrados nos quadros da página 3, como um ponto de partida. Estes podem ser incluídos como referências em um conjunto de dados do usuário (definido pelo próprio usuário) destacado como *Favourites* (favoritos). Um desenvolvedor experiente testaria novas combinações e melhorias e realizaria uma comparação desses com os já existentes. Nesse estudo de caso, nós seguiremos esta rota e testaremos configurações estruturais com apenas alguns componentes de materiais usuais, usando a ferramenta *Synthesizer* para orientar nosso desenvolvimento.

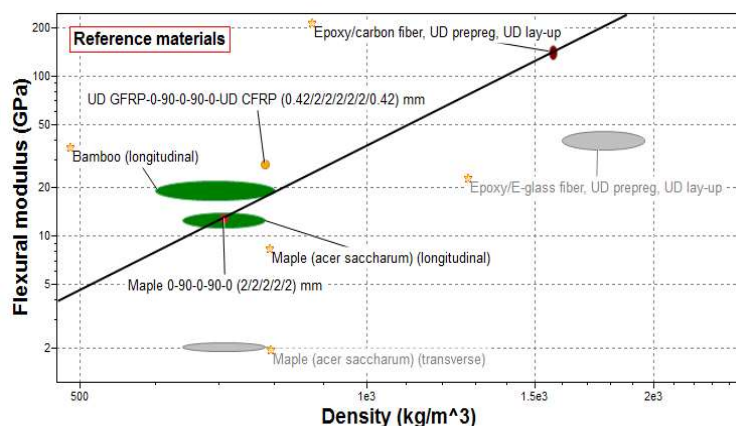




Qual seria o efeito da laminação do bordo ou de se utilizá-lo nas camadas de um compósito estrutural do tipo sanduíche? Isto pode ser investigado usando o *Synthesizer*, disponível em todas as bases de dados avançadas para especialistas (*Specialist databases*) do CES EduPack.



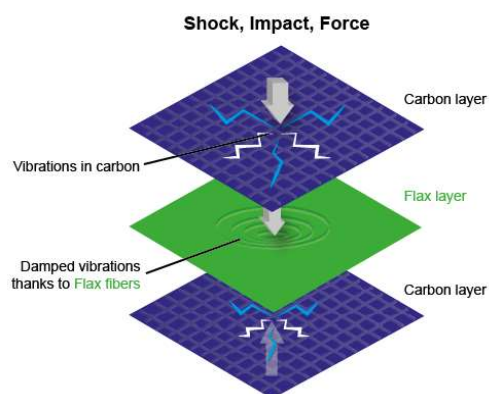
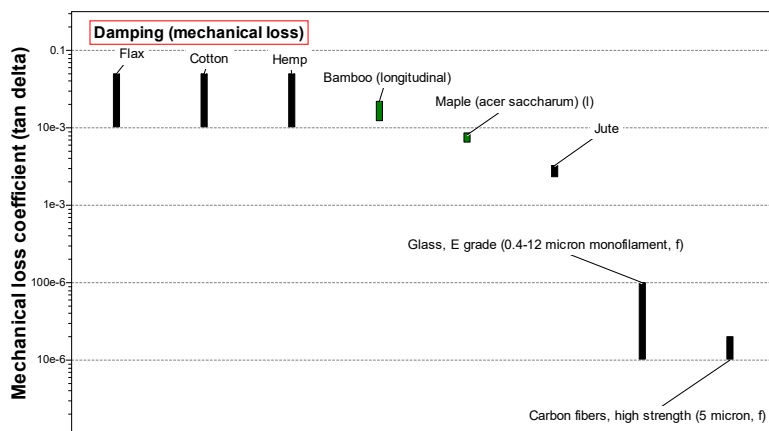
Ambas as questões acima podem ser respondidas usando um modelo multicamadas no *Synthesizer*. Alternando as camadas longitudinais e transversais de 2mm do bordo em um modelo de 5 camadas e em um modelo de 7 camadas com a mesma estrutura em sanduíche entre camada unidirecionais (UD) de PRFV e de PRFV de 0,42 mm, respectivamente. Os resultados são apresentados abaixo.



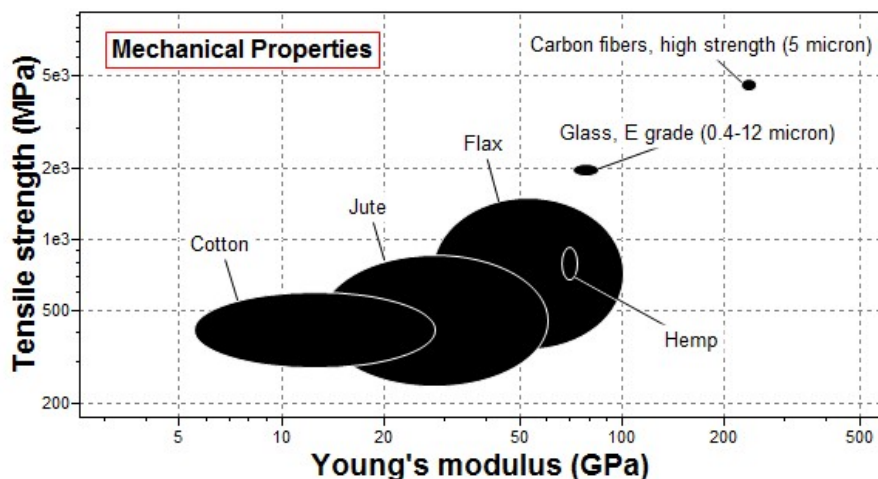
Nem pela laminação, nem construindo um compósito em multicamadas do tipo sanduíche de bordo entre as faces de polímeros reforçados com fibra foi possível melhorar o índice de mérito quando comparado com o bambu. Para melhorar o desempenho da tábua de bambu do skate, é necessário melhorar a rigidez à flexão e/ou reduzir a densidade. Qualquer das estruturas propostas pode ser testada usando o *Synthesizer* antes de construir os protótipos. Isto pode ser feito em combinação com o aprimoramento das propriedades de amortecimento (veja abaixo).

#### 4. Amortecimento

Se nós observarmos o segundo objetivo associado com o amortecimento vibracional no longboard, nós podemos ver que algumas fibras naturais são muito superiores às de carbono ou de vidro quando se leva em conta o coeficiente de perda mecânica. Cânhamo ou linho são fibras que estão prontamente disponíveis e que podem ser usadas como reforço em compósitos e ajudarão na redução das vibrações na tábua. O resultado é o mesmo, plotando integralmente o segundo objetivo, M2.



Um produto comercial baseado nessa ideia é comercializado pela Lineo [3]. Se as fibras naturais são dispostas em sanduíche entre camadas de PRFC acima e abaixo da tábua do skate, elas podem contribuir potencialmente tanto para o aumento do módulo de flexão quanto para o aumento do amortecimento. A razão de se escolher fibras de linho é que elas têm excelente desempenho no amortecimento assim como boas propriedades mecânicas, como pode ser visto abaixo. Proporções de até 50% de linho na resina epóxi são fornecidas por este fornecedor: *FlaxTape™* e *FlaxPreg™* [3].



A resistência a tração e a rigidez para algumas fibras usuais são mostradas abaixo. Com relação a rigidez, as fibras naturais são competitivas frente às fibras de vidro mas não às fibras de carbono. O linho é, potencialmente, melhor do que cânhamo, tanto em rigidez quanto em resistência. O *Synthesizer* pode ser usado para estimar propriedades de compósitos simples baseados em fibras de linho unidirecionais em uma matriz de epóxi.

O modelo unidirecional simples foi usado no *Synthesizer* para gerar dois registros com 40-50% de linho na matriz epóxi. Estes podem ser vistos no mapa da próxima seção. Nós usamos o registro de compósito sintetizado para 50% (o maior  $E_f$  e comercialmente disponível) em um modelo de camadas. Para reduzir a densidade, uma espuma rígida de PET foi utilizada como material do núcleo. Os detalhes são mostrados nas Notas (*Notes*), à direita, que mostram os dados de saída a partir dos dados registrados. Para fins didáticos, é importante discutir as limitações dos modelos, por isso o aviso. Todas as considerações e equações podem ser encontradas pelos botões **HELP > 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**

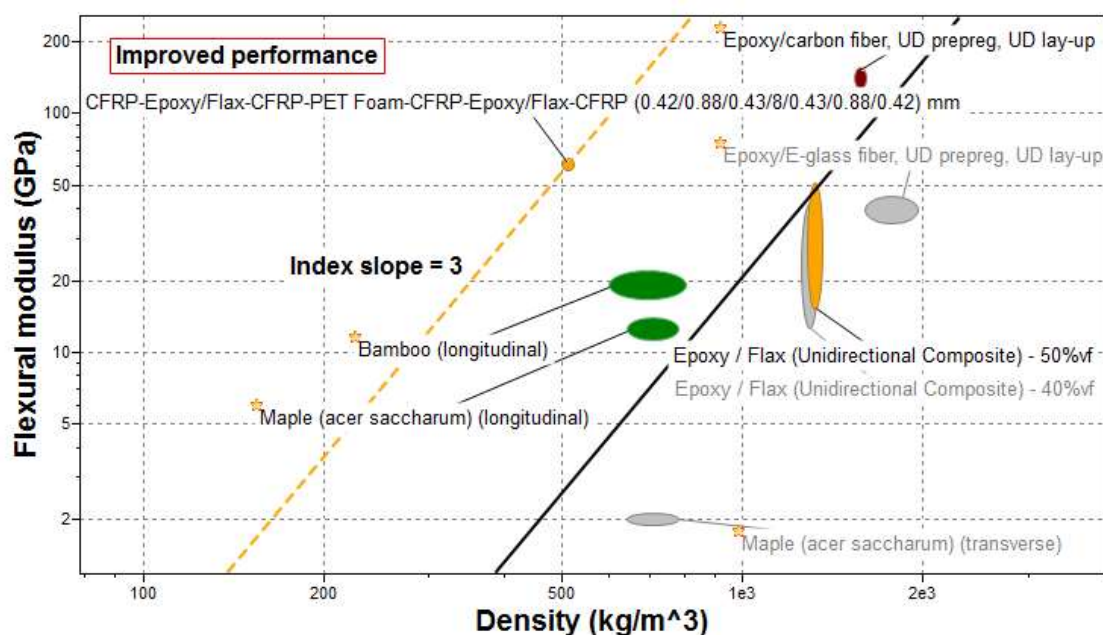
- Layer 7 (top) = Epoxy/carbon fiber, UD prepreg, UD lay-up
- Layer 6 = Epoxy / Flax (Unidirectional Composite) - 50%vf
- Layer 5 = Epoxy/carbon fiber, UD prepreg, UD lay-up
- Layer 4 = Polyethylene terephthalate foam (closed cell, 0.108)
- Layer 3 = Epoxy/carbon fiber, UD prepreg, UD lay-up
- Layer 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. Resultado e Verificação da Realidade



O mapa resultante mostra que a estrutura de 7 camadas proposta, com espuma de PET como material do núcleo e compósitos sanduíches como folhas na face, resultam em um aumento significativo de desempenho. Simulações adicionais, cálculos com elementos finitos e etc são necessários, mas a investigação usando o *Synthesizer* forneceu um caminho e pode consequentemente reduzir tempo, custo e esforço no desenvolvimento.

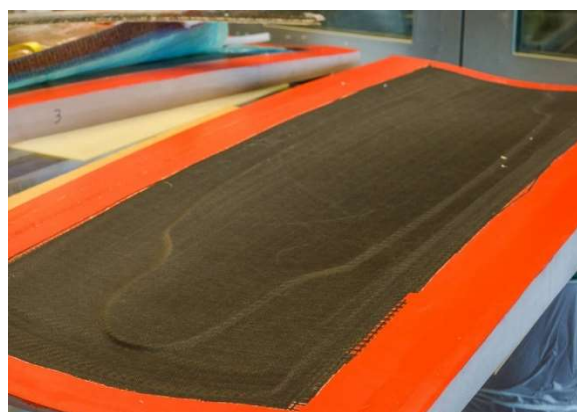
Este estudo de caso mostrou também como um engenheiro pode usar os dados e os mapas do CES EduPack para tomar decisões embasadas para melhorar o projeto da tábua de um longboard. Ele serve como um exemplo real para os estudantes, uma vez que foi usado por um instituto na Dinamarca, FORCE, para usar compósitos para aprimorar o desempenho. Protótipos de uma combinação muito similar de PRFC e linho/epóxi como materiais das faces em volta de uma espuma de PET rígida foram fabricados e testados pela FORCE Technology e estão sendo considerados para desenvolvimento comercial. Alguns dados dos ensaios estão incluídos abaixo (figuras fornecidas por Benjamin Hornblow, FORCE Technologies).

| Longboard                      | Espessura [mm] | Peso [g] | Flexão em 3 pontos [mm] |
|--------------------------------|----------------|----------|-------------------------|
| Referência                     | 9.8            | 1685     | 14                      |
| Painel sanduíche Carbono/linho | 11             | 1180     | 15                      |

**Diferença**

505 (30% de redução de peso)

O processo de fabricação de um longboard de compósito PRFC/linho com núcleo de espuma de PET, pela FORCE Technology é mostrado abaixo. A espuma de PET na forma, seguida pela cura estão nas figuras no alto da página e na parte inferior estão a seção transversal do protótipo final e o usuário testando o skate.





## 6. O que o CES EduPack nos Ajuda a Compreender?

O CES EduPack produz resultados quantitativos e altamente visuais interativamente, os quais, combinados com a expertise de materiais do educador, podem ajudar a ensinar o processo de projeto e como tomar boas decisões na seleção de materiais.

O CES EduPack ajuda a sugerir as seguintes conclusões:

- O software fornece o índice de mérito, nesse caso para um painel em flexão limitado pela rigidez, o que permite uma visão geral das propriedades dos materiais existentes. Isso fornece um bom ponto de partida para o desenvolvimento de produtos e uma direção clara para melhorias.
- As tábuas de bordo ou bambu disponíveis são difíceis de melhorar. A laminação ou a fabricação de estruturas sanduíche com camadas finas de compósitos reforçados com fibras não melhoram o desempenho.
- Uma ideia a partir de um compósito linho/epóxi comercialmente disponível poderia ser explorada primeiro gerando um registro de compósitos unidirecionais e então usando isto em um modelo de 7 camadas no *Synthesizer* com um núcleo de espuma de PET ao invés de madeira. Esses resultados melhoraram significativamente o desempenho.
- O CES EduPack foi capaz de replicar o caminho de desenvolvimento tomado pela FORCE Technology na Dinamarca para desenvolver e fabricar um protótipo de longboard nos seus laboratórios. Os testes mostram que a solução utilizando compósito sanduíche de PRFC e linho/epóxi nas faces e espuma de PET no núcleo resulta em 30% de redução de peso e uma melhor experiência para o skatista.



## 7. Referências

1. Benjamin Hornblow, Composites Specialist, FORCE Technology, [www.forcetechnology.com](http://www.forcetechnology.com)
2. A metodologia pode ser encontrada em, por exemplo, Ashby, M.F. (2005) "Materials Selection in Mechanical Design", 3rd edition, Butterworth Heinemann, Oxford, UK. ISBN 0-7506-6168-2.
3. Para o site e a descrição do produto, ver: [www.lineo.eu](http://www.lineo.eu)