

03-019

## **ECODESIGN STRATEGIES IN THE DEVELOPMENT OF A HEIGHT COMPENSATE SHOE FOR HYDROKINESITHERAPY TREATMENTS**

*González-Domínguez, Jaime <sup>(1)</sup>; Sánchez-Barroso, Gonzalo <sup>(1)</sup>; Gómez-Chaparro, Miguel <sup>(2)</sup>; García-Sanz-Calcedo, Justo <sup>(1)</sup>; López-Rodríguez, Fernando <sup>(1)</sup>*

<sup>(1)</sup> Universidad de Extremadura, <sup>(2)</sup> HM Hospitales

Nowadays, the optimization of production costs and material resources are aspects to be taken into account when designing a product. This allows for a reduction in the environmental impact and cost of the product. Therefore, the product gets an added value. The objective is to implement different eco-design strategies in a height-adjustable shoe that can compensate for the dysmetry of people who need hydrokinesitherapy treatments. Not only are people given proper accessibility to this treatment but also the product is achieved that respects the environment and sustainable development. The result was very positive, since a reduction in the resources used for the production of the shoe was achieved. Thanks to the correct choice of materials and design, it led to a reduction in the carbon footprint generated and the primary production energy consumption of the product.

*Keywords: eco-design; rehabilitation; sustainable; design hydrokinesitherapy*

## **ESTRATEGIAS DE ECODISEÑO EN EL DESARROLLO DE UN ZAPATO COMPENSADO EN ALTURA PARA TRATAMIENTOS DE HIDROCINESITERAPIA**

En la actualidad la optimización de los costes de producción y de los recursos materiales son aspectos a tener en cuenta a la hora de realizar el diseño de un producto. Esto permite una reducción del impacto ambiental y del coste del producto. De manera que, el producto obtiene un valor añadido. El objetivo consiste en la implementación de distintas estrategias de ecodiseño en un zapato regulable en altura que permite compensar la disimetría de las personas que necesiten tratamientos de hidrocinesiterapia. Con esto, no solo se otorga a las personas la correcta accesibilidad a este tratamiento, sino que también, se consigue que el producto respete el medio ambiente y el desarrollo sostenible. El resultado fue muy favorable, puesto que se consiguió una reducción de los recursos utilizados para la producción del zapato. Gracias a la correcta elección de los materiales y del diseño, provocó una disminución de la huella de carbono generada y del gasto energético de producción primaria del producto.

*Palabras clave: ecodiseño; rehabilitación; hidrocinesiterapia; diseño sostenible*

Correspondencia: Gonzalo Sánchez-Barroso Moreno [gsm@unex.es](mailto:gsm@unex.es)



©2020 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

De forma fisiológica, existen diferencias de longitud entre un miembro y otro que el cuerpo llega a compensar, sin embargo, cuando esa diferencia supera los 2-3cm, la disimetría comienza a ser perjudicial puesto que produce ciertas descompensaciones a nivel de la pelvis y de la columna ocasionando dolor lumbar o dificultades durante la marcha.

La hidrocinesiterapia, es una técnica de rehabilitación que aprovecha las propiedades térmicas y mecánicas que ofrece el medio acuático (Gómez, González, Martín, & Santana, 2020). Las clínicas especializadas en la rehabilitación de pacientes con enfermedades del aparato locomotor emplean la hidrocinesiterapia como una de sus principales técnicas de rehabilitación, siendo la marcha en reagua una de las terapias más empleadas dentro de la hidrocinesiterapia. Esta permite al paciente la correcta rehabilitación de sus capacidades motrices (Rabanal & Rodrigo, 2009).

En muchos de los casos, los pacientes sometidos a este tipo de terapias presentan una disimetría entre sus miembros inferiores, la cual, puede ser originada por alguna enfermedad del aparato locomotor, fracturas, cirugías, traumatismos, infecciones, etc. (de Pablos, 2015).

Por lo tanto, se ha realizado un modelo de un zapato ortopédico que permita al paciente un correcto movimiento del aparato locomotor durante la rehabilitación en el medio acuático, más concretamente, durante la reeducación de la marcha en agua. En consecuencia, el paciente consigue el máximo nivel de funcionalidad previniendo las complicaciones, aumentando la movilidad e independencia.

En la actualidad, el impacto ambiental se ha convertido en uno de los temas más importantes de la sociedad. Esto afecta a nivel político, social y económico (Perevochtchikova, 2013). La sociedad evoluciona hacia una economía que prioriza la reducción de los recursos empleados y la minimización de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Instituto Andaluz de Tecnología, 2014).

La sostenibilidad y el reciclaje se han convertido en palabras clave para un producto (Cicconi, 2020). De esta manera, la implantación de estrategias de economía circular en el desarrollo y diseño de producto es esencial para alcanzar estos términos. En concreto, se han aplicado estrategias de ecodiseño. Gracias a esta estrategia, se reducirá tanto la huella de carbono como la energía necesaria para la fabricación del producto (Stivale, 2020), es decir su impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida. Además, disminuye los costos de gestión de residuos y mejora la imagen del producto (AENOR, 2011).

El presente estudio académico trata de resolver el problema descrito anteriormente. Este surge en una clínica francesa especializada en rehabilitación, cuyos pacientes tienen inconvenientes para realizar correctamente su rehabilitación.

## 2. Objetivos

Los objetivos del trabajo se resumen a continuación:

- Realización de un zapato regulable en altura que compense la disimetría de las extremidades inferiores y un apropiado movimiento de flexión dorsal y extensión plantar (Sous Sánchez, Navarro Navarro, Navarro García, Brito Ojeda, & Ruiz Caballero, 2011) durante la marcha en agua.
- El Diseño respete el medio ambiente mediante la selección de los materiales con menor impacto ambiental y el diseño del zapato de forma que se minimice la cantidad de material empleado (Sanchis Gisbert, 2020).

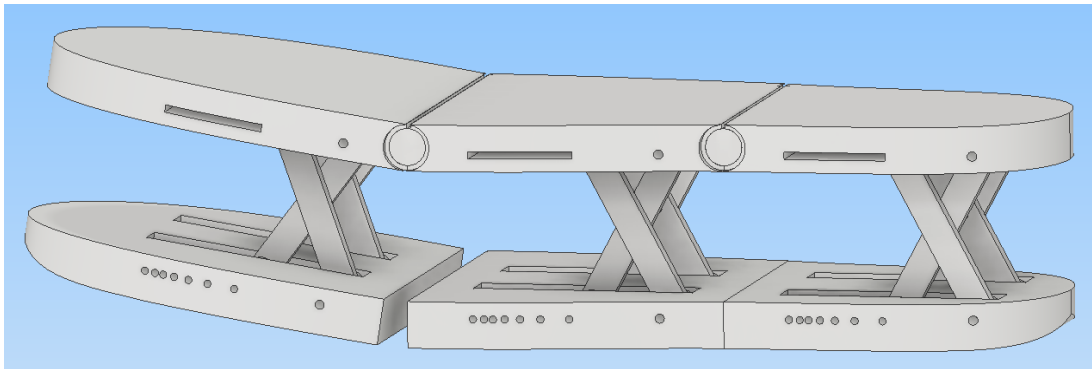
### 3. Metodología

La implantación del ecodiseño en el diseño del producto se ha realizado de dos formas: en el diseño de cada uno de los componentes importantes del zapato regulable en altura y en la selección de los materiales adecuados, siempre que permitan la funcionalidad del producto.

Primeramente, se estudiaron todos los aspectos relacionados con la antropometría del pie, con el objetivo de realizar un calzado que se adaptase correctamente. Debido a la escasez de estos estudios se utilizó un informe antropométrico de la población francesa (Ramiro, et al. 1995). Gracias a este, se establecieron las dimensiones geométricas adecuadas para la realización de la horma. De forma general, el diseño de la horma maestra tiene una talla media, en este caso se utilizó la talla 40 de la población masculina.

Tras la obtención de los límites geométricos de la horma, se realizó un modelado en 3D de las piezas gracias al empleo del programa Autodesk Inventor Professional 2017 (Autodesk, 2017). El modelado del producto se dividió en 5 componentes principales: la suela, la parte superior del zapato, la plantilla, y el sistema de elevación. Algunas de estas piezas diseñadas se muestran en las figuras 1.

**Figura 1: Sistema de elevación.**



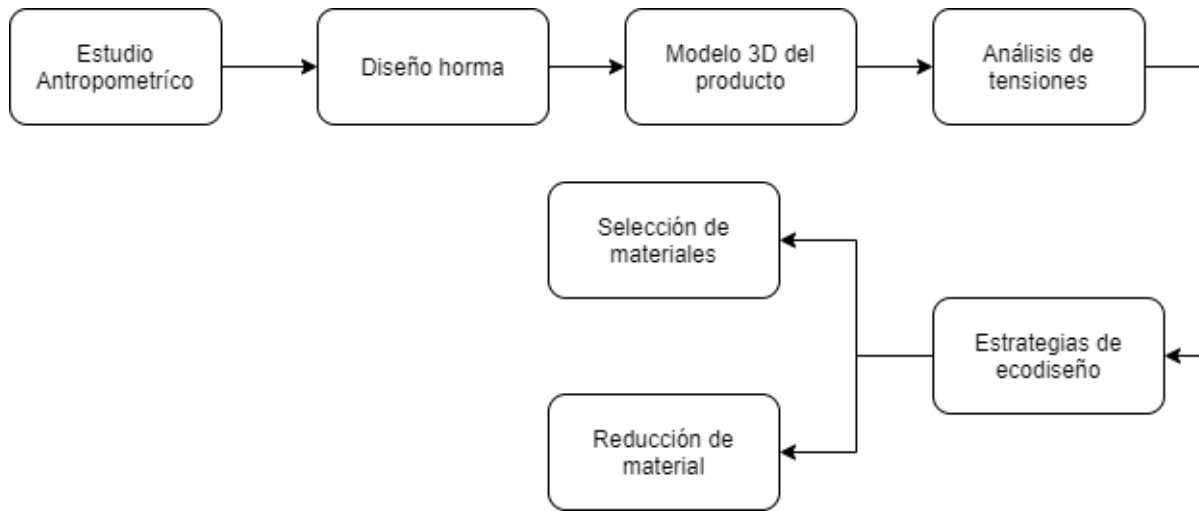
Este sistema de elevación se divide en dos partes: las plataformas superior e inferior y las piezas de regulación de altura. Este sistema permite corregir disimetrías entre 25-60 milímetros, a los que se debe sumar el grosor de la plantilla y suela utilizada. De esta manera, se corrigen un amplio rango de las disimetrías perjudiciales.

Para poder aplicar criterios de ecodiseño a los componentes modelados, primero se realizó la determinación del material más adecuado gracias al empleo del programa CES edupack (Grantadesign.com, 2010). Con este programa se compararon las distintas alternativas posibles en base a una serie de criterios iniciales: peso, coste, resistencia, higiene e impacto ambiental (energía de producción primaria y huella de carbono).

Tras esto, se procedió a la realización de un análisis de tensiones de von Mises (Ford & Malcolm A., 1963) para verificar la funcionalidad de la geometría y los materiales seleccionados. Este análisis se basará en la hipótesis que el paciente camine con el zapato sobre la superficie no acuática, con el objetivo de ponerse en la situación más desfavorable. De esta manera, se puede optimizar el diseño del producto para que este pueda cumplir con su función y minimizar el impacto ambiental.

A modo de resumen se presenta un esquema gráfico de la metodología seguida en este trabajo. En la figura 2 se muestra un esquema de la metodología.

**Figura 2: Esquema de la metodología empleada.**



## 4. Resultados

En este apartado se desarrollan dos estudios distintos. El primero se enfoca en seleccionar el material más adecuado para los componentes del zapato que van a tener que soportar las tensiones más elevadas durante la marcha del paciente, es decir, para las piezas e regulación de altura. Por lo tanto, para este análisis se priorizará la resistencia y el peso. De esta manera, no se siguen criterios de ecodiseño en este estudio, ya que la cantidad de material es insignificante y se prioriza su funcionalidad.

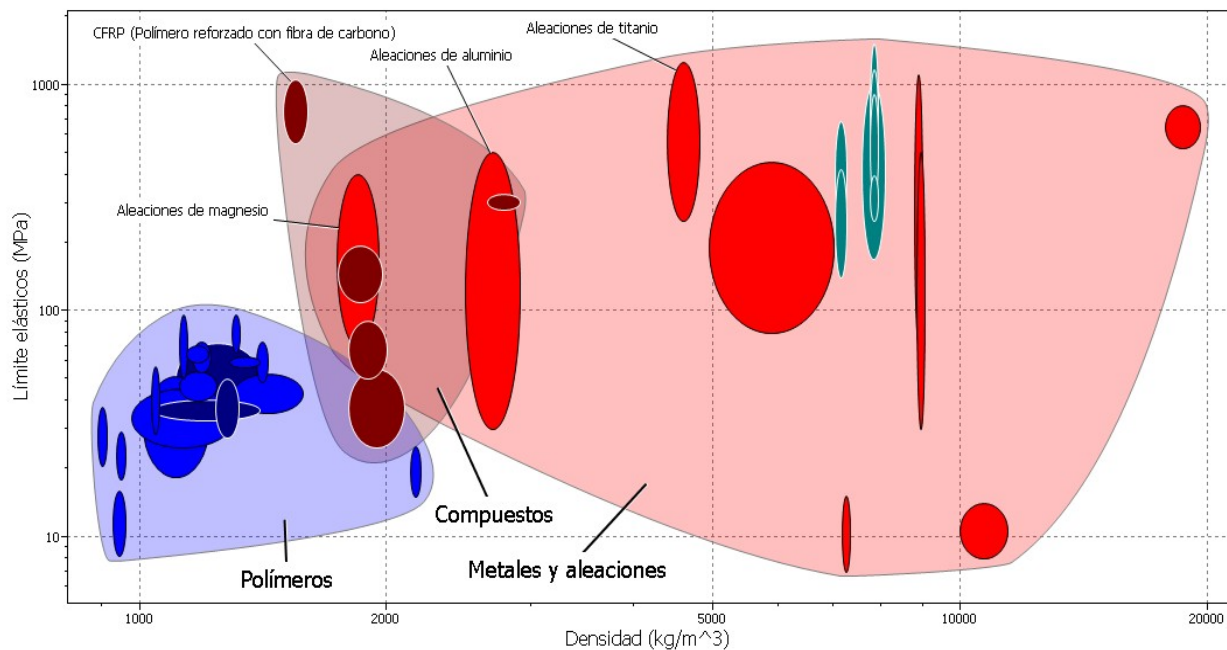
En este segundo estudio, se detalla el material de la plataforma superior e inferior del sistema de elevación. Se buscan materiales con límite elástico y una densidad más baja que los del primer estudio, ya que estas piezas no sufren esfuerzos elevados. Así se conseguiría un menor peso del producto lo que mejoraría su uso por el paciente. Esto se debe a que las piezas analizadas influyen considerablemente en el peso del calzado. Este material no deberá ser muy costoso y deberá minimizar el impacto ambiental. Para este último criterio se estudiarán 3 parámetros: la huella de carbono, la energía primaria de producción y la reciclabilidad del material.

### 4.1. Primer estudio

En primer lugar, debe realizarse una selección de entre todos los materiales existentes, descartando los grupos de materiales que no cumplan con los requisitos. De este modo son descartados los siguientes materiales: cerámicos y vidrios, los compuestos híbridos espumas, los materiales naturales híbridos y los elastómeros.

Tras una selección de los materiales que cumplen estas necesidades, se procede a la realización de un diagrama de burbujas para elegir los materiales de mayor resistencia y ligereza. Para ello, en la figura 3 se muestra el diagrama de burbujas donde se compara el límite elástico frente a la densidad.

**Figura 3: Diagrama de burbuja, límite elástico frente a la densidad. Fuente: (Grantadesign.com, 2010).**



Como se puede observar en el diagrama, los que presentan mejor relación de resistencia específica frente a la densidad son los polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP), las aleaciones de magnesio y las aleaciones de aluminio.

En la tabla 1 se resumen las propiedades de los materiales expuestos anteriormente.

**Tabla 1. Propiedades de los materiales del primer estudio**

Propiedades	Aleaciones de aluminio	Aleaciones de magnesio	CFRP (Fibra de carbono reforzada con polímero)
Límite elástico (MPa)	30-500	70-400	550-1050
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2500-2900	1740-1950	1500-1600

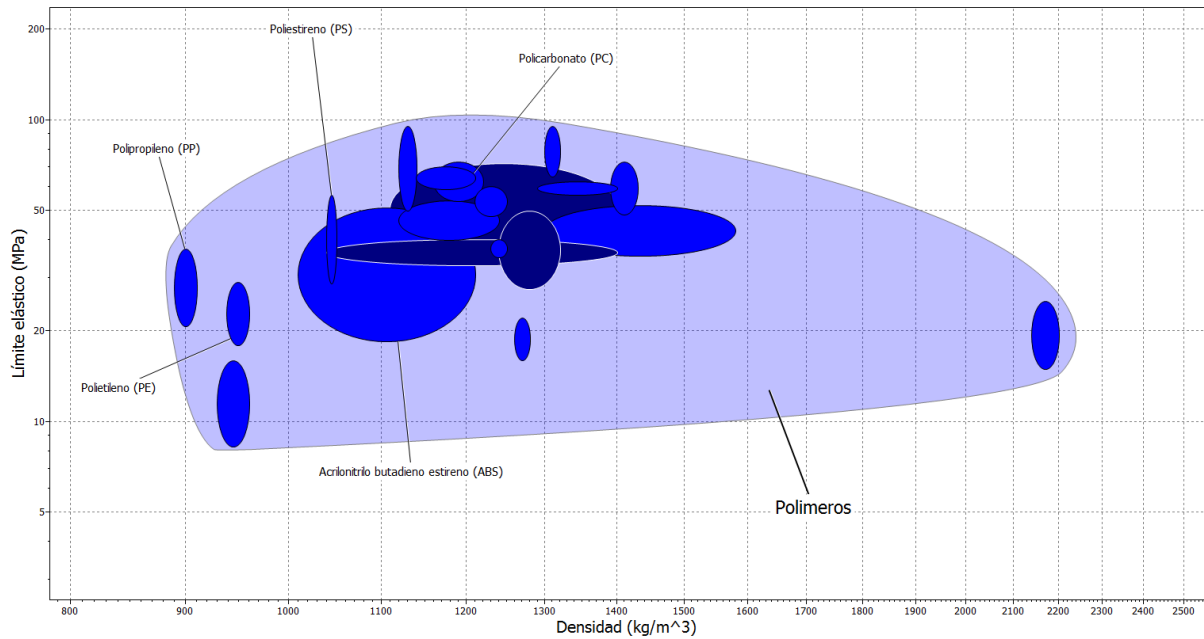
Se puede llegar a la conclusión que el material más conveniente en relación resistencia-peso es el CFRP (fibra de carbono reforzada con polímero).

#### 4.2. Segundo estudio

Para este estudio, se descartan los siguientes materiales: cerámicos y vidrios, los compuestos híbridos espumas, los híbridos materiales naturales, metales y los elastómeros. Por lo tanto, se centra en polímeros.

En la figura 4 se muestra el diagrama de burbuja donde se representa de nuevo el límite elástico de los materiales frente a la densidad de los mismos, pero esta vez solo con polímeros.

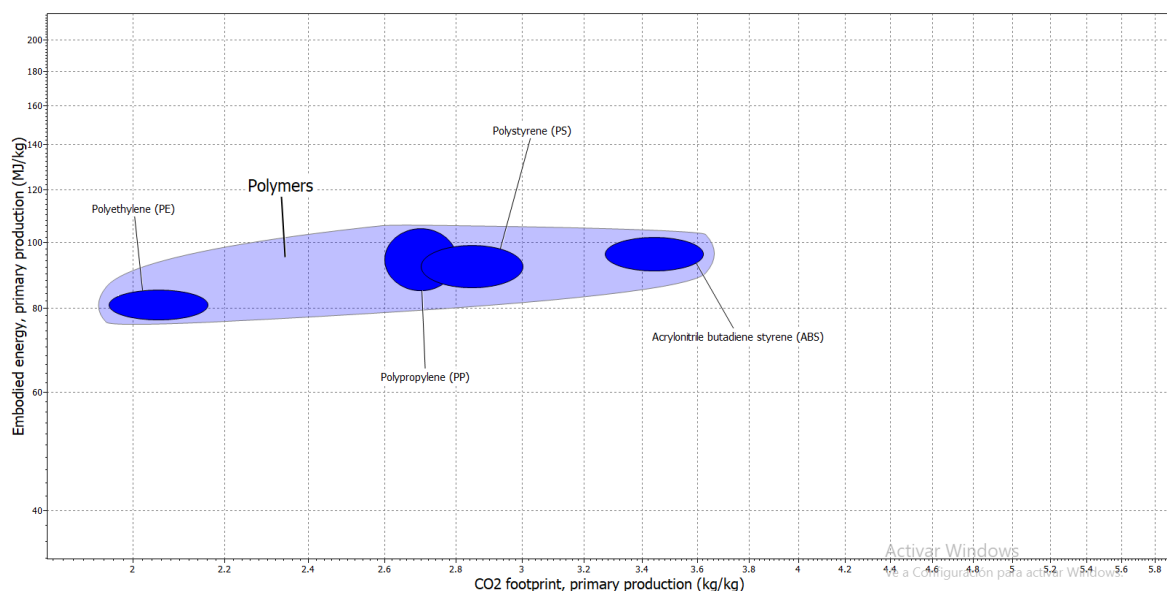
**Figura 4: Diagrama límite elástico de los polímeros frente a la densidad. Fuente: (Grantadesign.com, 2010).**



En la figura 5 se muestra un diagrama de burbujas donde se relaciona la huella de carbono del material frente a la energía primaria empleada para su producción y en la figura se determina si los materiales seleccionados son reciclables.

**Figura 5: Diagrama de burbujas de huella de carbono y energía primaria de producción.**

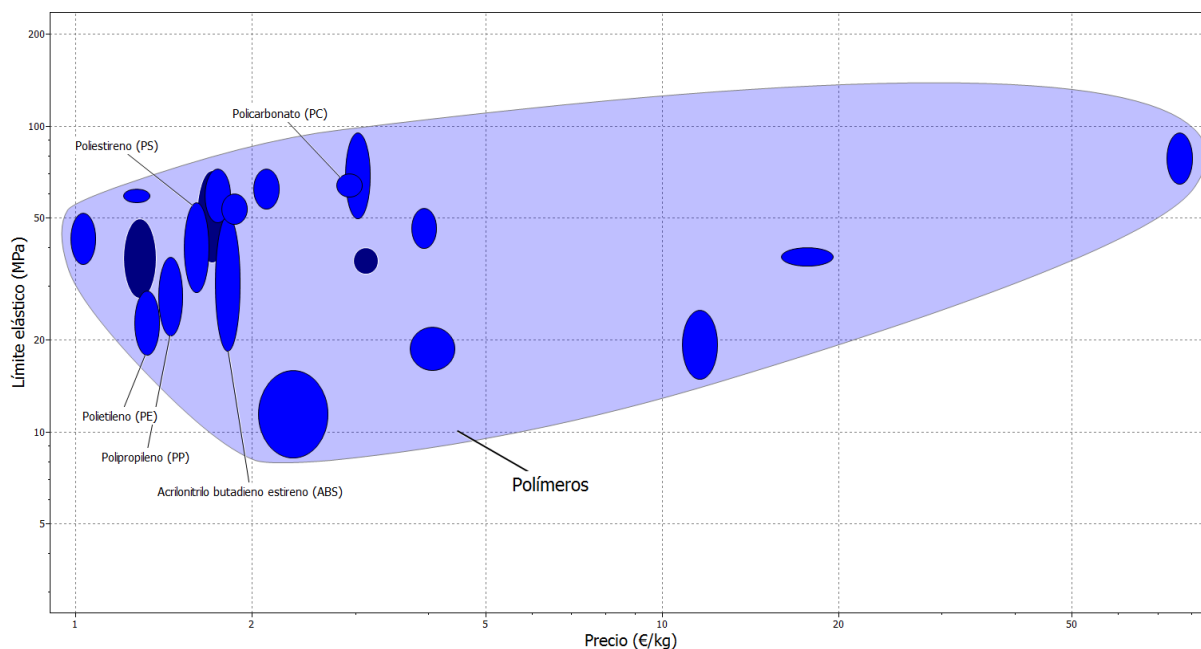
**Fuente: (Grantadesign.com, 2010).**



Como se refleja en el diagrama, los polímeros con mejor relación límite elástico frente a la densidad son el polipropileno (PP), polietileno (PE), poliestireno (PS) y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Si fuese necesario, para el cálculo de las tensiones, podríamos utilizar el policarbonato (PC), pero supondría un aumento en el peso debido a que su densidad es mayor.

En la figura 6 se observa el precio que tienen los materiales mencionados anteriormente y se puede determinar cuál de ellos es mejor para la reducción del coste del producto.

**Figura 6: Diagrama límite elástico de los polímeros frente al precio. Fuente: (Grantadesign.com, 2010).**



En la tabla 2 se resumen las propiedades de los materiales expuestas anteriormente en los dos diagramas de burbuja de este apartado.

**Tabla 2. Propiedades de los materiales.**

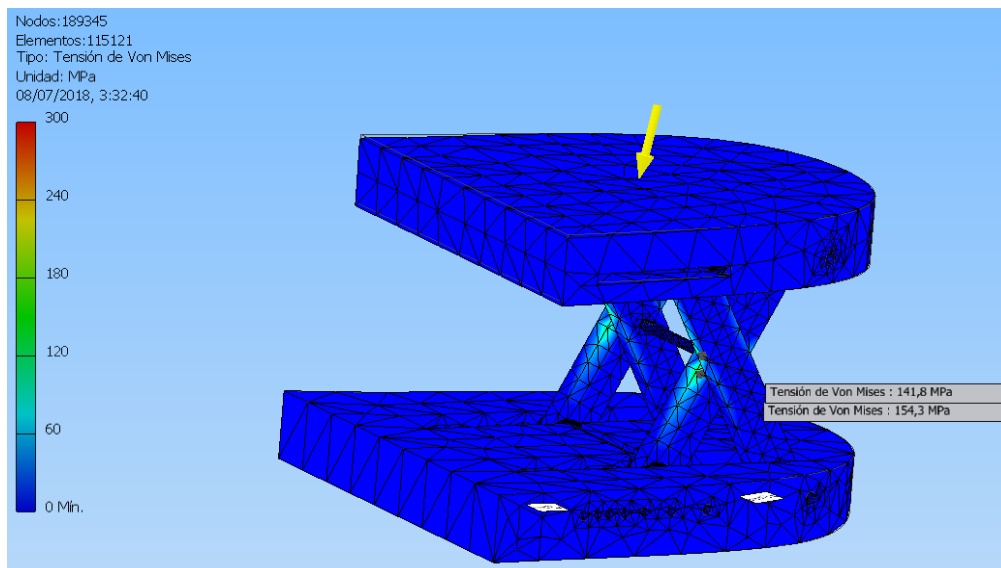
Propiedades	ABS	Polietileno	Polipropileno	Poliestireno
Límite elástico (MPa)	18,5 - 51	17,9 - 29	20,7 - 37,2	28,7 - 56,2
Densidad (kg/m3)	1010 - 1210	939 - 960	890 - 910	1040 - 1050
Precio (€/kg)	1,73 - 1,9	1,26 - 1,38	1,38 - 1,52	1,53 - 1,68
CO <sub>2</sub> (kg/kg)	3,27 - 3,62	1,95 - 2,16	2,6 - 2,8	2,7 - 2,3
Energía (MJ/kg)	91 - 102	76,9 - 85	85 - 105	86 - 99
Reciclable	SI	SI	SI	SI

Analizando la información proporcionada por la base de datos de CES edupack, se aprecia que el precio de todos los polímeros seleccionados está en torno a 1-3 €/kg, por lo cual este

factor no es determinante para la elección del material. El límite elástico de todos los materiales de este estudio tiene el valor lo suficientemente grande como para resistir la carga durante la marcha normal humana. En consecuencia, los parámetros principales para determinar el material más adecuado serán la densidad y los relacionados con el impacto ambiental. En este sentido, el mejor material es el polietileno, ya que presentan una menor huella de carbono y energía primaria necesaria para la producción. Además, su densidad es relativamente baja.

Para la realización del análisis de tensiones, se ha partido del escenario más desfavorable: el paciente camina en el medio terrestre, ya que en el medio acuático el peso del paciente se ve reducido. Además, se ha supuesto un peso del paciente de 80 kilogramos. Los resultados obtenidos en el análisis de tensiones verifican que estos materiales soportan las tensiones que se realizarían durante la marcha del paciente. En la figura 7 se muestra las tensiones máximas de von-Mises de este análisis.

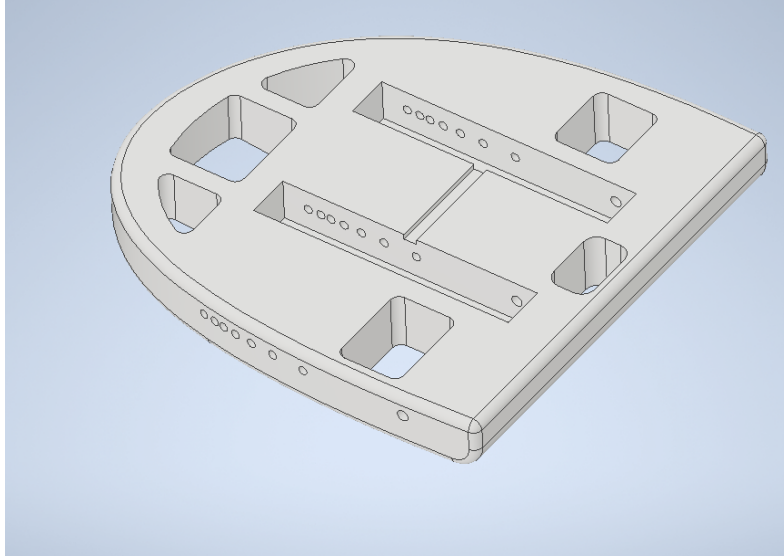
**Figura 7: Tensión de von-Mises.**



Como se puede apreciar estas tensiones son inferiores a la tensión de límite elástico de la fibra de carbono seleccionada y como las plataforma superior e inferior apenas presentan tensiones. Por lo tanto, a la hora de realizar un ecodiseño, este debe centrarse en reducir el material de las plataformas superior e inferior. En la figura 8 se muestra un ejemplo de una de las piezas del zapato a las que se ha sometido la reducción de material innecesario.

**Figura 8: Reducción de material de la plataforma inferior.**





Esto se realizó en todas las piezas que no presentan una sobrecarga de tensiones de tal manera que se redujo considerablemente el peso del producto, lo cual es primordial para el paciente y para el impacto ambiental del mismo. Gracias a esto el peso de las plataformas inferior y superior pasó de 0,588 a 0,492 kilogramos.

Para futuros trabajos, se recomienda ampliar la selección de materiales con otras bases de datos con el objetivo de aumentar el número de indicadores de impacto medioambiental. Esto conseguiría mejorar las limitaciones que ofrece la base de datos utilizada y aumentar la calidad del trabajo.

## 5. Conclusiones

Tanto los materiales utilizados en el producto como las dimensiones geométricas del diseño son adecuadas para soportar las cargas generadas por el paciente en la marcha sobre superficies no acuáticas. Se comprueba así que el producto resiste las cargas a las que está sometido durante su utilización, ya que la gran parte del tiempo va a utilizarse bajo el agua y aquí todas las cargas se ven seriamente reducidas.

Se ha realizado un estudio exhaustivo de los materiales existentes, descartando aquellos que no cumplieran con los requisitos impuestos en cada uno de los estudios realizados. Para el segundo estudio se priorizan aquellos materiales que reducen el impacto ambiental a la atmósfera. Gracias a esto, disminuye la cantidad de CO<sub>2</sub> que se emite a la atmósfera y la energía primaria consumida durante su fabricación.

Tras el análisis de las tensiones a las que está sometida el zapato, se determinaron que piezas o parte de las mismas pueden rediseñarse con el objetivo de reducir la cantidad de material empleado. Se consiguió reducir en un 16% de material de las plataformas superior e inferior.

Por lo tanto, se ha conseguido el objetivo inicial del trabajo que es desarrollo y diseño de un zapato regulable en altura para tratamientos de hidrocinesiterapia. Además, se ha implantado el ecodiseño mediante la determinación del material que genere un menor impacto ambiental y la reducción de la cantidad de material necesaria durante el diseño del producto.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y a la Consejería de Economía e Infraestructuras por el apoyo a este trabajo de investigación. Este estudio ha sido llevado a cabo a través del proyecto de investigación GR-18029 ligado al VI Plan Regional de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación de la Comunidad Autónoma de Extremadura 2017-2020.

## Referencias

AENOR. (2011). UNE-EN ISO 14006.

Autodesk. (2017). Autoesk Inventor professional 2017. San Rafael (California).

Cicconi, P. (2020). *Eco-design and Eco-materials: An interactive and collaborative approach*. Sustainable Materials and Technologies, 23.

de Pablos, J. (2015). *Dismetrías de los miembros inferiores*. MBA institute(13), 3-9.

Ford, H., & Malcolm A., J. (1963). *Advanced mechanics of materials*. London: Longmans.

Gómez, R., González, E., Martín, A., & Santana, L. (febrero de 2020). *Buenas Prácticas: Intervención interdisciplinar mediante terapia acuática*. Fisioterapia, terapia ocupacional y logopedia. Gran Canaria.

Grantadesign.com. (2010). CES EduPack - Granta Design.

Instituto Andaluz de Tecnología. (2014). *Ecodiseño en la gestión del ciclo de vida de los productos*. Congreso nacional del medio ambiente. Madrid.

Perevochtchikova, M. (2013). *La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales*. Gestión y Política Pública, 22(2), 283-312.

Rabanal, A., & Rodrigo, V. (2009). *Sistema autónomo para accesibilidad en piletas*. Universidad de buenos Aires.

Ramiro, J., Alcántara, E., Forner, A., Ferranis, R., García-Belenguer, A., Durá, J., & Vera, P. (1995). *Guía de recomendaciones para el diseño de calzado*. Instituto de Biomecánica de Valencia.

Sanchis Gisbert, R. (2020). *Eco-diseño en el Desarrollo de Productos*. Universidad Politécnica de Valencia: <http://hdl.handle.net/10251/139495>.

Sous Sánchez, J. O., Navarro Navarro, R., Navarro García, R., Brito Ojeda, E., & Ruiz Caballero, J. (2011). *Bases Biomecánicas del Tobillo*. Canarias Médica y quirúrgica, 8(24).

Stivale, S. (2020). *Los caminos del Diseño Sustentable y sus vinculaciones con la investigación en diseño*. Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación, 21(80), 77-90.

## Objetivos de Desarrollo Sostenible

