

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**  
**Departamento de Proyectos de Ingeniería**



Metodologías para el diseño y selección de  
embalajes de amortiguamiento optimizados, en  
función de su comportamiento funcional,  
económico y medioambiental.

24 de Noviembre 2015

**TESIS DOCTORAL**

PRESENTADA POR:

**Patricia Navarro Javierre**

DIRIGIDA POR:

**Dr. Vicente Agustín Cloquell Ballester**

**Dr. Manuel García - Romeu Martín**

A mi familia, amigos y a  
Jesús.

## RESUMEN

La tesis que a continuación se presenta, ha sido desarrollada en el programa Desarrollo, Sostenibilidad y Ecodiseño perteneciente al Departamento de Proyectos de Ingeniería de la Universidad Politécnica de Valencia. Consta de dos investigaciones experimentales que tratan de dar respuesta y justificar la necesidad de una metodología de selección de diferentes soluciones de embalaje de protección, teniendo en cuenta la variable funcional (crítica para poder contemplar la alternativa dentro del análisis), la variable medioambiental y la variable económica. En la actualidad la selección de las diferentes posibilidades de embalaje para la protección de un producto, se realiza en el mejor de los casos, en función de alguna de las variables anteriores, de forma independiente, sin tener en cuenta el conjunto de las tres. Como consecuencia, aparecen productos sobreembalados, donde el coste del embalaje y el impacto ambiental asociado al mismo son innecesarios o embalajes en los que se ha minimizado tanto el embalaje de protección que la posibilidad de que el producto sufra daños a lo largo de su ciclo de almacenamiento y distribución es importante, originándose pérdidas de producto e incluso de imagen/clientes.

Cada una de las tres variables a tener en cuenta en la metodología desarrollada en esta tesis, se determina a partir de métodos y/o herramientas científico/técnicas con el fin de aportar valor añadido a la nueva metodología.

En este sentido destacar que en el primero de los experimentos se realizó una comparativa de los diferentes métodos y/o técnicas existentes en la actualidad para determinar la capacidad de amortiguamiento de un material (variable funcional), de forma que el usuario de la metodología de selección pueda optimizar tiempos y costes en la caracterización de los materiales. La segunda experimentación es la propuesta en sí de la metodología de selección, aplicada a un caso práctico, con el fin de poder realizar un tutorial de su aplicación, donde la variable funcional se convierte en un requerimiento clave para poder realizar la selección entre las diferentes posibilidades de amortiguamiento funcionalmente optimizadas, en base a la variable medioambiental y económica. Estas dos variables se determinan mediante herramientas y/o métodos ya conocidos, en el caso de la variable medioambiental (ACV) y desarrollados a medida como en el caso de la variable económica (modelo de costes), que abarca los principales costes asociados al ciclo de vida del amortiguamiento, al igual que en análisis de ciclo de vida se estiman los impactos ambientales asociados a cada una de las etapas de su ciclo de vida.

Destacar que la variable funcional en la segunda experimentación se determina mediante un equipo desarrollado por ITENE siguiendo la norma ASTM D 1596, pero mejorado en el diseño, con el fin de reducir tiempos de ensayo y aumentar la fiabilidad y repetibilidad de los resultados. En definitiva la variable funcional es el requerimiento inicial a cumplir por las alternativas a comparar posteriormente, por ello en esta tesis se le ha dado un peso importante en las dos experimentaciones a su estudio no sólo en la caracterización del material sino en el método de diseño utilizado.

## RESUM

La tesis que a continuació es presenta, ha sigut desenvolupada en el programa Desenvolupament, Sostenibilitat i Ecodiseño pertanyent al Departament de Projectes d'Enginyeria de la Universitat Politècnica de València. Consta de dos investigacions experimentals que tracten de donar resposta i justificar la necessitat d'una metodologia de selecció de diferents solucions d'embalatge de protecció, tenint en compte la variable funcional (crítica per a poder contemplar l'alternativa dins de l'anàlisi), la variable mediambiental i la variable econòmica. En l'actualitat la selecció de les diferents possibilitats d'embalatge per a la protecció d'un producte, es realitza en el millor dels casos, en funció d'alguna de les variables anteriors, de forma independent, sense tindre en compte el conjunt de les tres. Com a conseqüència, apareixen productes sobreembalats, on el cost de l'embalatge i l'impacte ambiental associat al mateix són innecessaris o embalatges en els que s'ha minimitzat tant l'embalatge de protecció que la possibilitat de que el producte patisca danys al llarg del seu cicle d'emmagatzemament i distribució és important, originant-se pèrdues de producte i inclús d'imagen/clients.

Cada una de les tres variables a tindre en compte en la metodologia desenvolupada en esta tesis, es determina a partir de mètodes y/o ferramentes científico/técnicas a fi d'aportar valor afegit a la nova metodologia. En este sentit destacar que en el primer dels experiments es va realitzar una comparativa dels diferents mètodes y/o tècniques existents en l'actualitat per a determinar la capacitat d'amortiment d'un material (variable funcional), de manera que l'usuari de la metodologia de selecció puga optimitzar temps i costos en la caracterització dels materials. La segona experimentació és la proposta en si de la metodologia de selecció, aplicada a un cas pràctic, a fi de poder realitzar un tutorial de la seua aplicació, on la variable funcional es convertix en un requeriment clau per a poder realitzar la selecció entre les diferents possibilitats d'amortiment funcionalment optimitzades, basant-se en la variable mediambiental i econòmica. Estes dos variables es determinen per mitjà de ferramentes y/o mètodes ja coneguts, en el cas de la variable mediambiental (ACV) i desenvolupades a mesura com en el cas de la variable econòmica (model de costos) , que comprén els principals costos associats al cicle de vida de l'amortiment, igual que en anàlisi de cicle de vida s'estimen els impactes ambientals associats a cada una de les etapes del seu cicle de vida.

Destacar que la variable funcional en la segona experimentació, es determina per mitjà d'un equip desenvolupat per ITENE seguint la norma ASTM D 1596, però millorat en el disseny, a fi de reduir temps d'assaig i augmentar la fiabilitat i repetibilidad dels resultats. En definitiva la variable funcional és el requeriment inicial a complir per les alternatives a comparar posteriorment, per això en esta tesis se li ha donat un pes important en les dos experimentacions al seu estudi no sols en la caracterització del material sinó en el mètode de disseny utilitzat.

## **SUMMARY**

The thesis presented below, has been developed in Development program, Sustainability and Ecodesign in the Department of Engineering of the Polytechnic University of Valencia. It consists of two experimental investigations that try to answer and justify the need for a different selection methodology for protective packaging solutions, taking into account the functional variable (critical to contemplate the alternative in the analysis), the environmental variable and the economic variable. At present the selection of the different possibilities for the protection packaging of a product, takes place in the best of cases, according to any of the above variables, independently, regardless of the set of three. As a result, appear overpacked products, where the cost of packaging and the environmental impact associated are unnecessary or products in which packaging has been minimized, resulting in product losses and even image / customers.

Each of the three variables considered in the methodology developed in this thesis, is determined by methods, scientific / technical tools in order to add value to the new methodology.

In this regard, note that in the first experiment, a comparison of different methods and / or techniques existing at present, are performed to determine the cushion capacity of a material (functional variable), so that the user of the methodology selection, optimizes time and costs in the characterization of materials. The second experiment is the proposal itself of the selection methodology applied to a case study, in order to make a tutorial, where the functional variable becomes a key requirement to enable the selection between different functionally optimized possibilities, based on the environmental and economic variable. These two variables are determined using tools and / or methods known in the case of environmental variable (ACV) and developed in the case of the economic variable (cost model), covering the major costs associated with cushion cycle life.

Noted that the functional variable in the second experiment is determined by a device developed by ITENE following the ASTM D 1596 standard, but with the improved design, in order to reduce test times and increase the reliability and repeatability of results. Functional variable in this thesis has been given an important role in the two experiments to study not only in characterizing the material, but in the method of design requirement used.

## INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.	11
1.1.	JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.	14
1.2.	CUESTIONES A INVESTIGAR.	18
1.3.	PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.	19
2.	MARCO DE REFERENCIA.	21
2.1.	EL EMBALAJE DE PROTECCIÓN EFICIENTE.	21
2.2.	MÉTODO PARA EL DESARROLLO DE PROTECCIONES DE MATERIAL DE AMORTIGUAMIENTO OPTIMIZADOS.	22
2.3.	MÉTODOS PARA LA SELECCIÓN DE UN BLOQUEO DE PROTECCIÓN OPTIMIZADOS.	25
2.4.	MÉTODOS MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN.	26
2.5.	EVALUACIÓN AMBIENTAL DE ENVASES Y EMBALAJES.	38
3.	OBJETIVOS E HIPÓTESIS.	41
3.1.	OBJETIVOS.	41
3.2.	HIPÓTESIS.	43
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.	46
4.1.	EXPERIMENTO 1. ESTUDIO COMPARATIVO DE LA FIABILIDAD DE LAS CURVAS DE AMORTIGUAMIENTO.	46
4.2.	EXPERIMENTO 2. SELECCIÓN DEL MATERIAL DE AMORTIGUAMIENTO ÓPTIMO.	50
4.2.1.	Determinación de las curvas de amortiguamiento del material. Método ASTM D1596. Diseño del bloqueo mínimo necesario para cada material capaz de superar los riesgos del ciclo de distribución.	51
4.2.2.	Análisis del comportamiento medioambiental del bloqueo de material de amortiguamiento en cada una de sus etapas del ciclo de vida. Análisis de Ciclo de vida (ACV). Criterios medioambientales (C1).	54
4.2.3.	Desarrollo de un modelo económico. Criterios económicos (C2)	54
4.2.4.	Metodología basada en el análisis comparativo.	56
5.	RESULTADOS.	60
5.1.	EXPERIMENTO 1. ESTUDIO COMPARATIVO DE LA FIABILIDAD DE LAS CURVAS DE AMORTIGUAMIENTO.	60
5.2.	EXPERIMENTO 2. SELECCIÓN DEL MATERIAL DE AMORTIGUAMIENTO ÓPTIMO.	74
5.2.1.	Determinación de las propiedades físico – mecánicas: cantidad de amortiguamiento requerido. Diseño optimizado del bloqueo de protección (método de los seis pasos): Criterio Funcional.	76
5.2.2.	Estudio del comportamiento medioambiental del bloqueo de material de amortiguamiento en cada una de sus etapas de ciclo de vida. Análisis de ciclo de vida.	81
5.2.2.1.	Análisis de ciclo de vida del bloqueo de poliestireno expandido (EPS):	82
5.2.2.2.	Resultados del Análisis de ciclo de vida del bloqueo de PE no reticulado Select Azul, Etafoam®.	89
5.2.2.3.	Resultados del Análisis de ciclo de vida del bloqueo de espuma de PE reticulada ML – 33.	96
5.2.3.	Desarrollo de un modelo de costes para el bloqueo de material de amortiguamiento: Criterio económico.	103
5.2.4.	Análisis comparativo de las alternativas de bloqueo de material de amortiguamiento en base a los resultados de los dos criterios de selección estudiados.	107

6.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.	112
7.	FUTURAS INVESTIGACIONES.	120

**Listado de figuras:**

Figura 1	Protecciones interiores de espuma de PE. Fuente: Plaesa, Sealed air, Modisprem.	17
Figura 2	Protecciones interiores de EPS. Fuente: Plaesa, Valero.	17
Figura 3	Protecciones interiores de cartón comprimido. Fuente: Corrupad®.	17
Figura 4	Ejemplo de representación gráfica de una familia curvas de amortiguamiento de una espuma para una altura de caída, una misma densidad y diferentes espesores.	23
Figura 5	Representación de la ecuación exponencial del método de Burgess; Dynamic Stress (GS) vs Dynamic energy (sh/t).	25
Figura 6	Modelo Jerárquico para la Toma de decisiones con el AHP.	31
Figura 7	Escala de Saaty.	32
Figura 8	Muestras de 15 × 15 cm y 5 cm de espesor de las diferentes espumas.	42
Figura 9	Máquina de amortiguamiento + acelerómetro.	48
Figura 10	Máquina de compresión rápida.	49
Figura 11	Detalle máquina de compresión rápida.	50
Figura 12	Materiales de amortiguamiento seleccionados para la investigación: ML-33 (30 kg/m <sup>3</sup> ), Etafoam® (29 kg/m <sup>3</sup> ), EPS (10 kg/cm <sup>3</sup> ).	52
Figura 13	Máquina de cushion desarrollada por ITENE.	52
Figura 14	Diferentes análisis y técnicas utilizadas para el desarrollo de la metodología de selección.	57
Figura 15	Esquema de la metodología de selección.	58
Figura 16	Comparación de los resultados del PE y EPS en la representación gráfica de la carga frente a la deformación.	61
Figura 17	Comparación de las curvas de amortiguamiento obtenidas para la espuma de PE, mediante el método ASTM 1596 y mediante el método de Sek, sin el cálculo del factor de velocidad.	62
Figura 18	Comparación de las curvas de amortiguamiento obtenidas para el EPS, mediante el método ASTM 1596 y mediante el método de Sek, sin el cálculo del factor de velocidad.	62
Figura 19	Comparación de las curvas de amortiguamiento obtenidas para la espuma de PE, mediante el método ASTM 1596 y mediante el método de Burgess.	63
Figura 20	Comparación de las curvas de amortiguamiento obtenidas para la espuma de EPS, mediante el método ASTM 1596 y mediante el método de Burgess.	64
Figura 21	Comparación de las curvas obtenidas para la espuma de PE y el EPS, al representar el Tensión dinámica vs Energía dinámica.	65
Figura 22	Distribución del error (%) del método de Burgess en función del número de puntos seleccionados para el ajuste de la ecuación, en el caso del PE	66
Figura 23	Distribución del error (%) del método de Burgess en función del número de puntos seleccionados para el ajuste de la ecuación en el caso del EPS.	67
Figura 24	Distribución del error (%) del método de Burgess en función de la distancia que existe entre los puntos de carga dinámica seleccionados para realizar el ajuste, en el caso de la espuma de PE.	68
Figura 25	Distribución del error (%) del método de Burgess en función de la distancia que existe entre los puntos de carga dinámica seleccionados para realizar el ajuste, en el caso de la espuma de EPS.	68
Figura 26	Errores medios y máximos de los dos métodos frente a la altura de caída EPS.	70
Figura 27	Errores medios y máximos de los dos métodos frente a la tensión estática. EPS.	71

Figura 28	Errores medios y máximos de los dos métodos frente a la altura de caída. PE.	73
Figura 29	Errores medios y máximos de los dos métodos frente a la tensión estática. PE.	73
Figura 30	Cushion curves for the three-cushion material and 30, 60, 90, 120 cm (h of design).	78
Figura 31	Curvas de amortiguamiento de los tres materiales objeto de estudio y para una altura de caída de 90 cm.	79
Figura 32	Protección diseñada para PE foam; non-cross linked (Select Blue Etafoam®), and cross-linked (ML – 33)	80
Figura 33	Bloqueo de EPS.	82
Figura 34	Ciclo de vida del bloqueo de EPS.	83
Figura 35	EPS protecciones moldeadas y paletizadas (1.200 × 800 mm). 55 eps protecciones/pallet.	85
Figura 36	TV set embalado con protecciones de EPS (1.200 × 800 mm).Dimensión de la caja de c.o.: 1203×266×682 mm.	86
Figura 37	Esquema del ciclo de vida del Select Azul Etafoam®.	89
Figura 38	Láminas de Select Blue Etafoam® and ML-33 paletizadas (1.200 × 800 mm) y cargadas en un camión (5.898 × 2.352 × 2.500 mm).	91
Figura 39	Protecciones centrales y de esquina de Select Blue Etafoam® and ML-33 paletizadas (1.200 × 800 mm).	92
Figura 40	TV embalada con protecciones de Select Blue Etafoam® o ML-33 (1.200 × 800 mm). Dimensiones de la caja de cartón ondulado 1.096 × 190 × 675 mm.	92
Figura 41	Esquema del ciclo de vida del bloqueo de espuma de PE ML -33.	95
Figura 42	Gráfica comparación del ciclo de vida de los 3 bloqueos.	101

**Listado de tablas:**

Tabla 1	Resumen del experimento para determinar las curvas de amortiguamiento en el experimento 1.	47
Tabla 2	Resumen del experimento para la obtención de las curvas de amortiguamiento en el experimento 2.	53
Tabla 3	Descripción de los criterios considerados.	58
Tabla 4	Resumen del error máximo y medio para ambos métodos simplificados frente al estándar para el EPS.	69
Tabla 5	Resumen del error máximo y medio para las seis cargas estáticas consideradas hasta alturas de caída de 76.2 cm, para el EPS.	71
Tabla 6	Resumen del error medio y máximo calculado para las siete alturas de caída y PE-Etafoam®.	72
Tabla 7	Resumen del error máximo y medio para las seis cargas estáticas consideradas hasta alturas de caída de 76.2 cm, para el PE – Etafoam®.	73
Tabla 8	Valores de la altura de caída en función del peso del producto y diferentes niveles de seguridad.	76
Tabla 9	Valores de fragilidad en función de diferentes tipos de producto.	77
Tabla 10	Tabla resumen del peso de cada uno de las protecciones diseñadas en función de sus prestaciones físico – mecánicas (curvas de amortiguamiento).	80
Tabla 11	Material de amortiguamiento considerado.	102
Tabla 12	Costes transporte 0.	103
Tabla 13	Costes de fabricación.	104
Tabla 14	Costes transporte 1.	104
Tabla 15	Costes de almacenamiento asociados.	105
Tabla 16	Costes asociados a la TV embalada.	105
Tabla 17	Costes asociados a cada diseño de protección.	105
Tabla 18	Resultados criterio 1.	107
Tabla 19	Resultados criterio 2.	108
Tabla 20	Resultado de la suma de los dos criterios para cada una de las alternativas.	109
Tabla 21	Procedimiento para estimar los dos criterios medioambiental y económico.	115
Tabla 22	Resultados del análisis de sensibilidad.	117
Tabla 23	Clasificación de los tres materiales en función de los resultados del análisis de sensibilidad.	118

**Listado de ecuaciones:**

Ecuación 1	Ecuación de la tensión estática.	23
Ecuación 2	Ecuación del método de Burgess.	25
Ecuación 3	X <sub>1</sub> : El coste de las materias primas del material de amortiguamiento.	56
Ecuación 4	X <sub>2</sub> : Transporte 0 (100 km) de las láminas de espuma desde el fabricante al procesador.	56
Ecuación 5	X <sub>3</sub> : Costes derivados de la transformación del material.	56
Ecuación 6	X <sub>4</sub> : Costes asociados al transporte de las protecciones desde el fabricante de embalaje hasta el fabricante de televisores.	56
Ecuación 7	X <sub>5</sub> : Costes asociados al espacio ocupado en el almacén del fabricante de producto.	56
Ecuación 8	X <sub>6</sub> : Costes asociados al transporte del televisor una vez embalado.	56
Ecuación 9	Ecuación de costes de la metodología.	56

## **1. INTRODUCCIÓN.**

La tesis que a continuación se presenta, ha sido desarrollada en el programa Desarrollo, Sostenibilidad y Ecodiseño perteneciente al Departamento de Proyectos de Ingeniería de la Universidad Politécnica de Valencia. Consta de dos investigaciones experimentales que tratan de dar respuesta y justificar la necesidad de una metodología de selección de diferentes soluciones de embalaje de protección, teniendo en cuenta la variable funcional (crítica para poder contemplar la alternativa dentro del análisis), la variable medioambiental y la variable económica. En la actualidad la selección de las diferentes posibilidades de embalaje para la protección de un producto, se realiza en el mejor de los casos, en función de alguna de las variables anteriores, de forma independiente, sin tener en cuenta el conjunto de las tres. Como consecuencia, aparecen productos sobreembalados, donde el coste del embalaje y el impacto ambiental asociado al mismo son innecesarios o embalajes en los que se ha minimizado tanto el embalaje de protección que la posibilidad de que el producto sufra daños a lo largo de su ciclo de almacenamiento y distribución es importante, originándose pérdidas de producto e incluso de imagen/clientes.

Cada una de las tres variables a tener en cuenta en la metodología desarrollada en esta tesis, se determina a partir de métodos y/o herramientas científico/técnicas con el fin de aportar valor añadido a la nueva metodología.

En este sentido destacar que en el primero de los experimentos se realizó una comparativa de los diferentes métodos y/o técnicas existentes en la actualidad para determinar la capacidad de amortiguamiento de un material (variable funcional), de forma que el usuario de la metodología de selección pueda optimizar tiempos y costes en la caracterización de los materiales. La segunda experimentación es la propuesta en sí de la metodología de selección, aplicada a un caso práctico, con el fin de poder realizar un tutorial de su aplicación, donde la variable funcional se convierte en un requerimiento clave para poder realizar la selección entre las diferentes posibilidades de amortiguamiento funcionalmente optimizadas, en base a la variable medioambiental y económica. Estas dos variables se determinan mediante herramientas y/o métodos ya conocidos, en el caso de la variable medioambiental (ACV) y desarrollados a medida como en el caso de la variable económica (modelo de costes), que abarca los principales costes asociados al ciclo de vida del amortiguamiento, al igual que en análisis de ciclo de vida se estiman los impactos ambientales asociados a cada una de las etapas de su ciclo de vida.

Destacar que la determinación de la variable funcional en la segunda experimentación se determina mediante un equipo desarrollado por ITENE siguiendo la norma ASTM D 1596, pero mejorado en el diseño, con el fin de reducir tiempos de ensayo y aumentar la fiabilidad y repetibilidad de los resultados. En definitiva la variable funcional es el requerimiento inicial a cumplir por las alternativas a comparar posteriormente, por ello en esta tesis se le ha dado un peso importante en las dos experimentaciones a su estudio no sólo en la caracterización del material sino en el método de diseño utilizado.

Los objetivos e hipótesis de la presente tesis doctoral, han sido desarrollados en 2 investigaciones que pretenden generar un nuevo conocimiento en cuanto al diseño y

desarrollo de sistemas de amortiguamiento optimizados mejorar los métodos, y maquinaria disponible para la caracterización de los materiales de amortiguamiento, y el desarrollo de metodologías para la selección más idónea del bloqueo de protección para un producto, atendiendo no sólo a la funcionalidad sino teniendo en cuenta criterios económicos y medioambientales. Todo ello con el fin de que el bloqueo de protección seleccionado para un producto y ciclo de distribución concreto, además de estar optimizado, sea el más económico y que origine el menor impacto medioambiental posible.

A continuación se justifica la necesidad de los 2 experimentos llevados a cabo en esta tesis:

**EXPERIMENTO 1.** Estudio de la fiabilidad de las curvas de amortiguamiento resultantes de los métodos simplificados: método de Michael Sek y del método de Gary Burgess, frente a las obtenidas siguiendo el método tradicional recopilado en la norma ASTM D1596, aceptado industrialmente, aplicado a espumas de célula cerrada. Se utilizará como materiales el Poliestireno expandido (EPS) (15 kg/m<sup>3</sup>) y Etafoam® (29 kg/m<sup>3</sup>).

El método tradicional para la obtención de las curvas de amortiguamiento de un material de embalaje, requiere de excesivo tiempo y número de muestras que propician la falta de actualización de las curvas de amortiguamiento asociadas a los diferentes materiales comerciales y que raramente se obtienen en el caso de nuevos materiales de amortiguamiento, como por ejemplo los desarrollados a partir de materiales biodegradables. Como consecuencia de la dificultad para encontrar las curvas de amortiguamiento de un material, el diseño optimizado de las protecciones internas de un producto a partir de materiales de amortiguamiento, en función de los requerimientos derivados del producto y de las características del ciclo de distribución, se realizan en base a la experiencia del distribuidor, del diseñador y realizando ensayos de prueba y error. Por este motivo en muchos de los casos se producen pérdidas de beneficio bien por un sobre – embalaje o bien por un embalaje insuficiente. Además en muchos de los casos mediante unos bloqueos de material de amortiguamiento optimizados, se ahorran costes asociados tanto al material de embalaje como a las pérdidas de producto y al utilizar la mínima cantidad de material de protección necesaria, puede mejorarse, el comportamiento medioambiental.

En los últimos tiempos se han desarrollado métodos alternativos al recogido en la norma ASTM D1596, con el fin de reducir tiempos y muestras, de forma que se pudieran caracterizar de forma sencilla los materiales de amortiguamiento de nueva aparición así como los existentes. No obstante no se han investigado suficiente y no se conoce la fiabilidad de los resultados obtenidos mediante estos métodos y los obtenidos mediante el método tradicional. Igualmente también es desconocido sí estos métodos se pueden aplicar a todos los materiales de amortiguamiento o bien la fiabilidad de los resultados cambia en función de la naturaleza del material de amortiguamiento y el método seleccionado. Además de estudiar los tres métodos indicados y la desviación de los resultados obtenidos entre ellos para espumas de amortiguamiento de célula cerrada, se han desarrollado posibles mejoras

para poder aumentar el grado de proximidad entre los resultados de los métodos simplificados y el método tradicional recogido en la norma ASTM D1596, con menor tiempo y coste.

**EXPERIMENTO 2.** Selección del material de amortiguamiento óptimo. Desarrollo de un método para la selección del material de amortiguamiento óptimo para la protección de un producto, teniendo en cuenta su capacidad para proteger al producto: características amortiguantes (curvas de amortiguamiento), comportamiento medioambiental y costes asociados a lo largo de todo su ciclo de vida.

La presión normativa, la demanda del consumidor y de la sociedad en general hace que se tienda a productos y servicios medioambientalmente responsables, especialmente en los envases y embalajes (suponen, más de un tercio de los residuos sólidos urbanos).

La Sostenibilidad ambiental solo es posible bajo la premisa de la Sostenibilidad económica, lo que en una situación de presión de costes como la actual, implica que las reducciones de impacto ambiental han de ir acompañadas de reducciones de coste.

Estas dos tendencias en la gran distribución; sostenibilidad económica y medioambiental, han llevado a las empresas, a realizar cambios en el diseño o tipo de materiales de envase y embalaje a utilizar, basándose en la experiencia propia y de sus proveedores de envase y embalaje.

Actualmente no existe una metodología de trabajo que permita seleccionar el bloqueo de material de amortiguamiento que cumpliendo con los requerimientos de protección del producto (variable funcional), permita seleccionar aquella alternativa con la mejor puntuación del binomio económico y medioambiental. Mediante el desarrollo de esta metodología basada en un análisis comparativo, se pretende que los diseñadores y usuarios de los sistemas de amortiguamiento de un producto, seleccionen la mejor alternativa teniendo en cuenta las dos variables enunciadas. La investigación descrita en este Experimento explica de forma detallada como se valora para cada material de amortiguamiento, cada una de las variables, es decir que la metodología de selección a su vez engloba una serie de métodos y herramientas existentes en la actualidad (Análisis de vida; ACV, método de los seis pasos para el diseño de un amortiguamiento), mejorados (determinación de las curvas de amortiguamiento de un material) e incluso de nuevo desarrollo como el modelo de costes.

Igualmente con el fin de poder validar la idoneidad de la metodología de selección resultante, se planteó un caso práctico: la selección del material de amortiguamiento óptimo para la protección de un televisor de 42 pulgadas, el cual actualmente se encuentra protegido mediante unos bloqueos de poliestireno expandido, teniendo en cuenta un ciclo de distribución particular, así como el resto de las etapas de su ciclo de vida. Mediante esta investigación se pretende facilitar una herramienta de selección que permita a su vez cuantificar el coste y el impacto medioambiental asociado a un material de amortiguamiento

y en definitiva a su bloqueo resultante. De modo que en el momento de seleccionar un bloqueo de amortiguamiento para un producto y ciclo de distribución concreto no es suficiente con asegurarse de que el cálculo de la superficies del material (con un espesor y densidad concretos) necesarias para su protección está bien realizado (variable funcional), hay que comparar su comportamiento medioambiental y su coste con los bloqueos resultantes de otros posibles materiales de amortiguamiento. Esta necesidad surge porque resulta engañosa la percepción de determinados materiales en cuanto a su comportamiento medioambiental, o bien que mediante la reducción del material independientemente de su naturaleza, se alcanza el mejor comportamiento medioambiental posible, sin valorar otros posibles materiales. En otras ocasiones directamente se rechazan materiales de protección por su coste sin valorar que dadas sus características de amortiguamiento la cantidad necesaria para proteger a un producto frente a los riesgos de un ciclo de distribución concreto, será inferior a la de otros materiales y por lo tanto su precio deja de ser motivo de rechazo etc.

### **1.1. JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.**

El embalaje se ha convertido en una parte integral de la sociedad moderna, con el fin de proteger, distribuir y ofrecer información de los productos en la industria, negocios y consumidores. Desde una perspectiva holística, un sistema de embalaje ha de cumplir con los requerimientos de protección (características técnicas), económicos y sociales. (Bovea M.D., Serrano J., Bruscas G.M., 2006).

El mercado anual del embalaje, a nivel mundial, se estima en uno 500 billones de dólares americanos y se espera que aumente un porcentaje anual comprendido entre 1.5 y 2.5 %. (IAPRI, Singapore, 1999). En términos de toneladas el consumo mundial se espera aumentar desde 150 millones de toneladas (1985), hasta 270 millones de toneladas en el año 2000. El volumen de embalajes derivados del plástico, se espera que triplique su cantidad en el mismo periodo de tiempo (Paine, F.A., 1991). Por este motivo es necesario minimizar la cantidad de material consumida, no solo para ahorrar costes sino por una cuestión medioambiental también.

La presión normativa, la demanda del consumidor y de la sociedad en general hace que se tienda a productos y servicios medioambientalmente responsables. En concreto, esta tendencia es especialmente relevante en los envases y embalajes, puesto que actualmente suponen más de un tercio de los residuos sólidos urbanos además de ser elementos imprescindibles para la distribución de productos de cualquier sector.

La Sostenibilidad ambiental sólo es posible bajo la premisa de la Sostenibilidad económica, lo que en una situación de presión de costes como la actual, implica que las reducciones de impacto ambiental han de ir acompañadas de reducciones de coste. Por este motivo, los

sectores empresariales, están especialmente sensibilizados en la minimización de costes y de impactos medioambientales, mediante la optimización de los envases y embalajes necesarios para la expedición de sus productos. En este sentido los consumidores y la legislación son los principales impulsores para el diseño sostenible.

Estas dos tendencias, han llevado a las empresas usuarias y fabricantes de envases y embalajes a realizar cambios en el diseño o tipo de materiales, basándose principalmente en su propia experiencia, sin una fase previa de análisis de riesgos, posibles cálculos atendiendo a criterios técnicos o para cumplir con los requerimientos de sostenibilidad ambiental (económicos + medioambientales + sociales). Por lo que pueden darse situaciones en las que los productos se encuentren sobreembalados o por el contrario presenten un sistema de envase y embalaje excesivamente minimizado, que igualmente repercute en un aumento de los costes (daños en el producto) ó simplemente no cumplen los objetivos de sostenibilidad.

En la actualidad las empresas fabricantes de productos (usuarias de embalajes) o incluso fabricantes de envases y embalajes, no suelen aplicar métodos para un desarrollo eficiente de los embalajes; minimización de costes e impactos medioambientales, derivados del embalaje y de su ciclo de distribución. Pese a que no existen estudios que corroboren la falta de método en el proceso de mejora y optimización de los embalajes, la experiencia en el sector de envase y embalaje, de institutos tecnológicos como ITENE (Instituto del embalaje, transporte y logística) lo confirman. Aquellas empresas que optimizan sus sistemas de envase y embalaje utilizan métodos que simplifican la realidad, por lo que en vez de proteger el producto ocasionan el efecto contrario, incrementando el nivel de daño del mismo.

La falta o excesiva reducción del embalaje, identificada por técnicos de ITENE en su labor de asesoramiento a usuarios y fabricantes de envase y embalaje, es consecuencia principal de las siguientes causas:

- Bajo conocimiento acerca de los impactos ambientales provocados por los envases y embalajes y cómo minimizarlos.
- Escaso nivel científico-técnico en la consideración de riesgos reales de la distribución en los nuevos diseños de envases y embalajes que permitan su optimización, uso de normas o procedimientos obsoletos etc.
- Cambios en los diseños/materiales de envases y embalajes, utilizados basados únicamente en las experiencias empresariales.
- Uso excesivo/mínimo de materiales de envase y embalaje; sobreembalaje para evitar problemas en la distribución/infraembalaje que lleva a pérdidas de producto.
- No hay una integración clara de indicadores ambientales en el diseño de los envases.
- No se conoce la relación óptima de envase; embalaje/impactos ambientales/impactos económicos.
- Diversas metodologías para la optimización, pero carencia de una que contemple de forma global la variable funcional, económica y medioambiental específica para embalajes y de uso sencillo por parte de las empresas.

Destacar que la tendencia actual, hacia la optimización en el sector de envase y embalaje es especialmente importante en los materiales de protección y amortiguamiento, siempre que se garantice que el producto llega en perfectas condiciones a su destino final (Oestergaard S., 1991).

En definitiva con la optimización del embalaje se pretende utilizar la menor cantidad de material de protección posible por producto expedido, consiguiendo reducir los costes asociados al embalaje así como los costes de su ciclo de distribución y de forma paralela los impactos medioambientales asociados a ambos dos. El objetivo final es desarrollar embalajes eficientes que con la menor cantidad de material protejan al producto a lo largo de su ciclo de distribución, evitando pérdidas de producto, reclamaciones etc. (Richards D.P., 1990).

Según datos proporcionados por las compañías aseguradoras el 75 % (García - Romeu. M., Tesis UPV, 2008), de las pérdidas por daños en productos provocados por un embalaje deficiente, se podrían evitar, de la misma forma que podrían reducirse el sobre - coste innecesario consecuencia de envases y embalajes sobredimensionados.

Por todas las razones indicadas hasta el momento existe la necesidad de desarrollar metodologías para la optimización de los diseños, para poder reducir los costes e impactos asociados a un sistema de protección que ha de proteger al producto hasta su destino final, (Gordon G., 1972).

En este sentido se han propuesto métodos alternativos para facilitar la caracterización de los materiales de protección y por lo tanto facilitar las tareas de diseño en base a una especificación técnica específica para cada material (Kipp W.I., 2000).

Es importante resaltar la importancia que tiene el embalaje sobre el coste final de un producto y la repercusión de este sobre la producción de la empresa. Además existe un coste añadido en las empresas referidas al daño del producto. Se estima que aproximadamente las reclamaciones de las empresas a las compañías de transporte ascienden a unos 2 billones de euros al año, aunque el verdadero coste para ellos asciende a más de 10 billones. Esta diferencia es consecuencia de las reclamaciones no pagadas por los transportistas y de los costes de los procesos de las reclamaciones por ambas partes, principalmente (García - Romeu. M., Tesis UPV, 2008).

Las protecciones interiores, o acondicionadores más habituales son desarrollos de cartón, pulpa de papel, nido de abeja, o de espumas como el polietileno (PE) de célula cerrada no reticuladas (Etafoam®) ó reticuladas (ML - 33), de polipropileno (PP), espuma de célula abierta: poliuretano (EPU), de poliestireno expandido (EPS), etc, que tienen por objeto proteger o inmovilizar el producto dentro de un embalaje.

El acondicionador se adapta a la forma y dimensiones del producto o del embalaje haciendo en ocasiones, funciones de separador evitando el roce entre productos y en otras, de elemento de relleno y fijación para impedir su movimiento.

En las siguientes figuras se pueden observar algunos de los materiales de embalaje indicados:



Fig 1. Protecciones interiores de espuma de PE. Fuente: Plaesa, Sealed air, Modisprem.

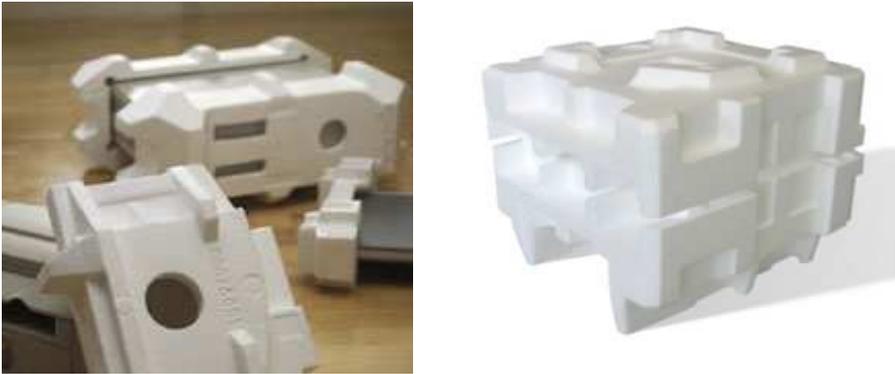


Fig 2. Protecciones interiores de EPS. Fuente: Plaesa, Valero.

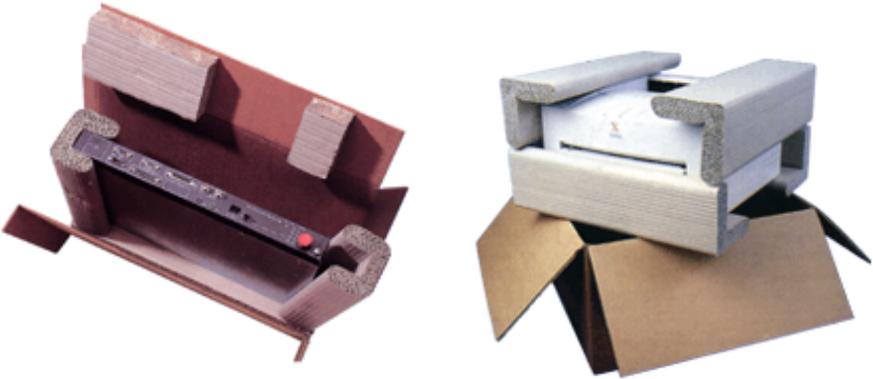


Fig 3. Protecciones interiores de cartón comprimido. Fuente: Corrupad@.

Por lo que el proceso de caracterización de los materiales de amortiguamiento (obtención de las curvas de amortiguamiento) es fundamental en el proceso de optimización, tanto en la caracterización de nuevos materiales, como en la etapa de diseño de las protecciones.

**El procedimiento estándar** para diseñar un amortiguamiento para un producto específico, implica el uso de datos recopilados en las curvas de amortiguamiento, puesto que dan a conocer la cantidad mínima necesaria de material para proteger al producto en una caída desde una altura conocida.

De ahí la importancia de este tipo de información para poder desarrollar un elemento amortiguador optimizado, tratando de que proteja al producto a lo largo de su ciclo de distribución con la menor cantidad de material, pudiendo resultar en una reducción de los costes e impactos medioambientales, asociados al material de embalaje y al transporte (Bovea M.A., et al., 2006).

Estas curvas de amortiguamiento son características de cada material y de su fabricante. Sin embargo las curvas no son siempre precisas, resultando obsoletas en muchos de los casos, debido a que las propiedades de los materiales de amortiguamiento cambian continuamente como consecuencia de la mejora de sus procesos de fabricación y que los ensayos tradicionales para caracterizarlos requieren, tiempo y costes excesivos (ASTM Standards, 2006; ASTM D1596). Igualmente destacar que en los últimos años se desarrollan nuevos materiales derivados de otras fuentes diferentes al petróleo, con lo cual resulta fundamental el conocer sus propiedades amortiguantes para poder realizar diseños optimizados y a su vez poder compararlos con los materiales de amortiguamiento de uso más extendido.

No obstante en este procedimiento para diseñar bloqueos interiores de material de amortiguamiento, no se tiene en cuenta el análisis de la variable medioambiental y económica del diseño desarrollado, aspectos importantes en el momento de seleccionar el material de protección de un producto en función de su fragilidad y de la severidad de los riesgos derivados de su ciclo de distribución.

## **1.2. CUESTIÓN A INVESTIGAR.**

Como consecuencia de la problemática descrita en el apartado anterior, mediante el desarrollo de esta tesis, se pretende investigar y profundizar en los métodos y procedimientos existentes en la actualidad para poder optimizar los sistemas de embalaje utilizados por las empresas, con el fin de mejorar la eficiencia de los mismos. Esta investigación pretende mejorar los métodos de caracterización de los materiales de amortiguamiento (obtención de las curvas de amortiguamiento), aumentando su precisión con respecto al método estandarizado recogido en la norma ASTM D1596, al mismo tiempo que se reducen tiempos y el coste asociado a este método tradicional.

Igualmente se pretende desarrollar una metodología de optimización de los materiales de amortiguamiento que no sólo contemple la variable funcional (comportamiento físico –

mecánico) del material sino que integre otro tipo de variables como la medioambiental y económica, las cuales son fundamentales, en la selección de un diseño de protección interna, puesto que no es viable la sostenibilidad medioambiental sin la económica. No es suficiente con la determinación de la mínima cantidad de un material para proteger a un producto en función de una altura de caída, es necesario conocer si existen otros materiales diseñados en función de sus propiedades de amortiguamiento (curvas), que puedan ser más económicos y presentar un comportamiento medioambiental mejor. Se trata en definitiva de una metodología basada en el análisis comparativo, donde a partir de varios criterios, y de varias alternativas de embalaje se ha de llegar a la decisión de seleccionar el que cumpla en mayor grado con las variables especificadas.

### **1.3. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION.**

La investigación se ha dividido en dos grandes experimentos con el fin de resolver la problemática descrita:

El **Experimento primero**, se centra en el método estándar de caracterización de los materiales de amortiguamiento de la norma ASTM D1596, así como en dos de los métodos alternativos para la obtención de las curvas de amortiguamiento. Todo ello como consecuencia de que el método de caracterización según la norma ASTM D1596, resulta complicado por los elevados costes de material y tiempos que se necesitan para obtener los puntos que conforman cada una de las curvas. Esta situación a su vez, provoca que en la especificación técnica de los materiales de amortiguamiento aparezca información interesante como la resistencia a la tracción, alargamiento, compresión remanente al 25 %, tras 0.5 h y 24 h de recuperación, resistencia al desgarrar etc, pero no suficiente para poder diseñar un bloqueo interior optimizado, puesto que carecen de las curvas de amortiguamiento del material. Generalmente los bloqueos interiores de los embalajes utilizados para inmovilizar los productos en el interior de los embalajes y además protegerlos frente a caídas, vibraciones, e impactos, se diseñan en base a la experiencia y realizando ensayos de prueba y error.

Por ello en los últimos años se han desarrollado nuevos métodos que permiten reducir los costes y tiempos necesarios para la obtención de las curvas de amortiguamiento, actualizando las existentes y con el fin de caracterizar las propiedades de amortiguación de los nuevos materiales que van surgiendo. De esta forma se pueden comparar las propiedades de amortiguación de diferentes materiales mejorando la optimización del bloqueo.

Los métodos alternativos al recogido en la norma ASTM D1596, para la determinación de las curvas de amortiguamiento que han sido propuestos por sus creadores son:

- El método de Michael Sek.

- El método de Gary Burgess Stress – Energy method (dynamic stress versus dynamic energy).

Estos métodos no están siendo utilizados ampliamente en la actualidad debido a la escasa investigación aplicada y viabilidad en cuanto a la precisión y/o errores que pueden tener en comparación con la normativa ASTM, ampliamente estudiada pero poco aplicada debido al coste en tiempo y dinero que supone. De ahí la importancia de estudiar los diferentes métodos desarrollados hasta el momento para la obtención de las curvas de amortiguamiento, compararlos entre sí y con el método que se recoge en la normativa ASTM, e incluso proponer mejoras.

En el **Experimento segundo**, se desarrolla una metodología de selección de un diseño de material amortiguante funcional (diseño del bloqueo en función de las curvas de amortiguamiento) contemplando varios materiales, en función del criterio medioambiental (a partir del análisis de ciclo de vida simplificado del embalaje diseñado) y del criterio económico (costes derivados del propio diseño desarrollado así como los diferentes transportes asociados al embalaje con y sin producto etc).

En este segundo Experimento la obtención de las curvas de amortiguamiento de los materiales contemplados, se realiza utilizando parte de las mejoras propuestas en el Experimento primero que permiten el diseño y desarrollo de bloqueos optimizados. Dado que la sostenibilidad medioambiental ha de estar unida a la sostenibilidad económica, además de ser una protección viable a nivel técnico: protege al producto frente a vibraciones y choques entre otros, a lo largo de su ciclo de distribución, se han de analizar su comportamiento medioambiental y económico, con el fin de llegar a un punto de equilibrio entre las tres variables; funcional, medioambiental y económica.

En la actualidad el análisis de estas 3 variables para un material de amortiguamiento dado, no se encuentra contemplado de forma global en ningún tipo de metodología, que permita tener a los materiales de amortiguamiento caracterizados a estos niveles y poder comparar entre varios de ellos, con el fin de seleccionar el que más se aproxime al cumplimiento del triple objetivo. La investigación para el desarrollo de esta metodología de selección de un bloqueo viable a nivel funcional (atendiendo a varios materiales de amortiguamiento), para proteger un producto a lo largo de su ciclo de distribución atendiendo a la variable medioambiental y económica, se desarrolla en el Experimento 2.

## **2. MARCO DE REFERENCIA.**

En este apartado, se describe la importancia de desarrollar embalajes eficientes como el objetivo principal de esta tesis, así como los antecedentes existentes, que resultan claves para el desarrollo de los dos experimentos:

En el caso del Experimento 1 (Estudio comparativo de la fiabilidad de las curvas de amortiguamiento desarrolladas por los métodos abreviados frente al estándar ASTM D1596), e describe en detalle el método existente en la actualidad para el diseño optimizado de materiales de amortiguamiento: El método de los seis pasos. Dentro de este método hay uno de los pasos que es la caracterización de los materiales de amortiguamiento; la obtención de las curvas de amortiguamiento, imprescindibles para llevar a cabo este método. Por ese motivo se realiza un análisis comparativo entre el método estándar norma ASTM D 1596 y los métodos abreviados desarrollados en los últimos años (M. Sek, G. Burgess), con el fin de conocer sus desviaciones frente a la norma, idoneidad para ser aplicados a diferentes materiales de amortiguamiento, posibles mejoras en el método o incluso en los equipos necesarios para la obtención de los datos. De cada uno de los dos métodos abreviados y de la norma se destacan posibles ventajas e inconvenientes, con el fin de poder interpretar a posteriori los resultados obtenidos en la parte experimental.

Igualmente en el Experimento 2 (Selección del material de amortiguamiento óptimo, desarrollo del método), se describen:

- ✓ La ausencia de métodos de selección de un bloqueo de protección optimizado (funcionalmente viable con la mínima cantidad de materia), atendiendo al criterio económico y medioambiental. La tendencia es a considerar las tres variables funcional, económica y medioambiental, de forma aislada e independiente en el proceso de diseño y selección de una protección de material de amortiguamiento.
- ✓ Los diferentes métodos multicriterio, sus antecedentes, para llevar a cabo un proceso de selección atendiendo a diferentes criterios y alternativas.
- ✓ La metodología de análisis de ciclo de vida, atendiendo a las normas necesarias para su aplicación ISO 14040:1998; ISO 14041:1999; ISO 14042: 2001; ISO 14043:2001, entre otros aspectos de interés, que sustentan la importancia de conocer el impacto ambiental asociado a un producto desde su origen hasta el fin de su vida útil. Se concluye el tipo de programa a utilizar y versión del Ecoindicador seleccionada.
- ✓ El desarrollo de un modelo de costes, para el bloqueo diseñado.

### **2.1. EL EMBALAJE DE PROTECCIÓN EFICIENTE.**

La tecnología moderna de la Ingeniería del embalaje ha sido la responsable de contribuir significativamente a nuestros estándares de vida, al permitir preservar y distribuir los bienes de consumo a gran escala. Hace unos años se estimó que el envío anual de materiales de embalaje y maquinaria alrededor del mundo excedería los 238 billones de dólares americanos (Anon., 1996).

Uno de los objetivos del embalaje de protección eficiente es proteger a los productos contra impactos, vibraciones, que pueden ocurrir durante el transporte y distribución. Mediante los materiales de amortiguamiento el nivel de impactos y vibraciones transmitidos a los productos, se reducen a través de los materiales de amortiguamiento. El nivel de protección que necesita un producto viene dado por su fragilidad (susceptibilidad al daño) y por el nivel de severidad de los riesgos derivados del ciclo de distribución del producto. Por lo que resulta esencial para poder diseñar un embalaje óptimo el conocimiento de las características amortiguantes del material, así como la fragilidad del producto y el nivel de severidad de los riesgos derivados del ciclo de distribución del producto.

Embalajes deficientes o no efectivos son fácilmente identificados al manifestarse, durante el transporte y las tareas de mantenimiento, mediante incidencias de daño en los productos. El sobre - embalaje sin embargo es difícil de identificar. El sobre - embalaje se define como el exceso de material de amortiguamiento utilizado con respecto a los riesgos de daño esperados (García-Romeu, M., Tesis UPV, 2008).

En los Estados Unidos, se ha estimado que el coste no aparente asociado con el sobre-embalaje, es 20 veces superior al coste del material de embalaje y ha sido estimado en 130 billones de euros por año (Oestergaard., 1991). En este coste se incluyen aquellos asociados con la eliminación de los residuos, incremento del tráfico, polución, y deterioro acelerado de las carreteras por el transporte de productos sobre-embalados. Por lo que la optimización de los sistemas de envase y embalaje de los productos se convierte en una necesidad para poder reducir costes y el impacto medioambiental asociado.

## **2.2. MÉTODOS PARA EL DESARROLLO DE PROTECCIONES DE MATERIAL DE AMORTIGUAMIENTO OPTIMIZADOS. (Experimento 1).**

**Uno de los métodos más conocidos para poder diseñar bloqueos de material de amortiguamiento optimizados es el Método de los seis pasos, (Root., 1997).**

A modo de resumen se indican los seis pasos de los que consta:

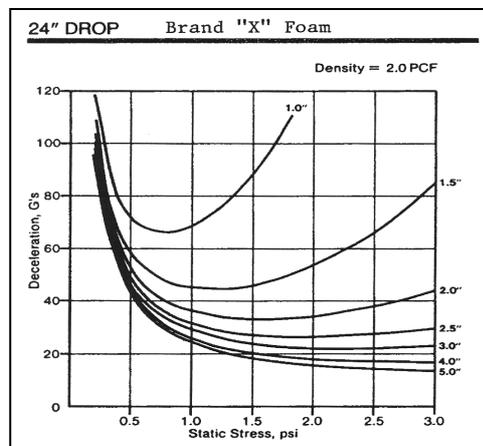
1. Análisis de los riesgos del ciclo de distribución del producto.
2. Determinación de la fragilidad del producto a proteger.
3. Rediseño del producto para mejorar su resistencia, en caso de que sea necesario y/o posible.
- 4. Caracterizar el material de amortiguamiento. Obtención de las cushion curves.**
5. Diseñar el amortiguamiento.
6. Ensayar y validar el sistema producto - embalaje, mediante ensayos de simulación de los riesgos derivados del transporte.

El paso 4, es fundamental para poder diseñar protecciones optimizadas. No obstante para poder caracterizar los materiales de amortiguamiento se pueden utilizar los métodos indicados anteriormente. A continuación se describen todos ellos brevemente:

### Método de la norma ASTM D1596

Este es el método estándar tradicionalmente utilizado a nivel industrial para la caracterización de los materiales de amortiguamiento. No obstante dado que se necesitan elevados tiempos y muestras para poder obtener las curvas de amortiguamiento de los materiales, no está muy extendido su uso. Por lo que las curvas de amortiguamiento de los materiales necesarias para el diseño de bloqueos de protección optimizados, o no se encuentran o están generalmente obsoletas.

En la siguiente figura se muestran curvas de amortiguamiento características del poliestireno expandido (EPS), obtenidas realizando el procedimiento de ensayo de la norma ASTM D1596.



$$\sigma_s = \frac{\text{Peso}}{\text{Area}} \quad [1]$$

Fig 4. Ejemplo de representación gráfica de una familia curvas de amortiguamiento de una espuma para una altura de caída, una misma densidad y diferentes espesores. Supporting materials FS 10. <http://www.packaging.msu.edu>.

Estas curvas son generadas impactando diversas masas, sobre varias muestras del material (diversos espesores) a diversas alturas usando una máquina especial para tal propósito. Por lo tanto para una altura de caída y una densidad de material se obtienen tantas curvas como espesores de material se consideren de interés.

En la grafica anterior se pueden observar los siguientes datos:

- Altura de caída para la que pueden ser utilizadas.
- Material del que se trata y su densidad.
- Curvas para diversos espesores.

Del ensayo únicamente se obtiene la máxima aceleración producida en cada impacto para una determinada altura, peso y espesor. Las curvas relacionan la máxima aceleración que se experimentó al caer un determinado peso desde una altura determinada, con un espesor de material determinado y con una tensión estática.

Por los motivos anteriormente indicados, en los últimos años surgen métodos simplificados alternativos al método estándar recopilado en la norma ASTM D1596, cuyo objetivo es reducir los tiempos necesarios, el número de muestras necesarias sin perder la precisión y fiabilidad que a priori tiene el método estándar industrialmente aceptado. A continuación se describen brevemente los métodos objeto de estudio de esta investigación:

#### **El método de Michael Sek.**

Este método (Sek et al., 2000) reduce considerablemente los tiempos de ensayo y número de muestras, en comparación con el método tradicional, recopilado en la norma ASTM D1596. Las curvas de amortiguamiento se determinan a partir de la resistencia a compresión del amortiguamiento a elevada velocidad (gráfica tensión versus deformación). Tras la aplicación de un algoritmo a la curva de compresión-deformación obtenida a alta velocidad se obtienen las curvas. El principal inconveniente son los medios o máquinas de ensayo para realizar esta compresión a alta velocidad, debido a su elevado coste y poca accesibilidad. Las máquinas universales de ensayo de tornillo, las más accesibles rondan los 0.02 m/s, otras hidráulicas no tan accesibles rondan los 0.25 m/s y aquellas necesarias para aplicar el método y no depender de un factor de velocidad dinámico que incorpore errores en las curvas, ha de tener velocidades superiores, las cuales son escasas e inaccesibles para la mayoría de empresas. ITENE cuenta con una máquina en la cual el desplazamiento del pistón llega a una velocidad máxima de 0.425 m/s, capaz de aplicar el método.

#### **El método de Burgess.**

Este método (Burgess G., 1994), al igual que el anterior, permite reducir el tiempo de ensayo del material para la obtención de su curva de amortiguamiento así como el número de muestras. El principal inconveniente de este método es que el material de amortiguamiento debería de seguir una determinada expresión de curva fuerza-deformación cuando es sometido a este ensayo. No todos los materiales se ajustan a la expresión especificada por Burgess.

El objetivo de este método es determinar las propiedades de amortiguamiento mediante una única ecuación que sea capaz de generar cualquier curva de amortiguamiento para un material específico, reduciendo las combinaciones posibles entre las diferentes alturas de caída, tensión dinámica y espesor.

A continuación se muestra la ecuación y un ejemplo de representación:

$$[2] \begin{cases} \text{Dynamic\_stress} = a \cdot e^{b \cdot \text{energy\_density}} \\ \text{Energy\_density} = \frac{\text{Static\_Stress} \cdot \text{Drop\_height}}{\text{Cushion\_thickness}} \\ \text{Dynamic\_stress} = \text{Peak\_acceleration} \cdot \text{Static\_stress} \end{cases}$$

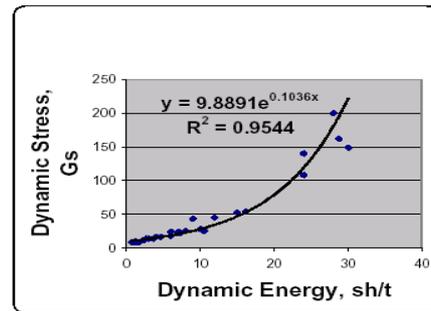


Fig 5. Representación de la ecuación exponencial del método de Burgess; Dynamic Stress (Gs) vs Dynamic energy (sh/t). Burgess G., 1994.

Destacar que el método de los seis pasos y los otros dos métodos abreviados: Método M. Sek y el Método de G. Burgess no se rigen por consideraciones económicas ni medioambientales que condicionan también, el diseño de productos y embalajes para la distribución y mantenimiento, se fundamentan en la capacidad de amortiguamiento de los materiales. Para conseguir un sistema producto - embalaje optimizado se ha de llegar a un compromiso entre el coste asociado por el incremento de la resistencia del producto y el asociado a la mejora del embalaje de protección. El sistema de embalaje óptimo es el que minimiza el coste total debido al coste del propio embalaje y los costes debidos a daños del producto en el proceso de distribución. No obstante no se consideran los costes del transporte debidos a un sobre-embalaje del producto, ni los derivados del espacio extra que ocupan los productos sobre-embalados durante el almacenamiento etc.

Por otro lado en esta metodología de los seis pasos no se contempla el análisis del comportamiento medioambiental del diseño, siendo este un aspecto clave para la selección de un embalaje, puesto que la sostenibilidad ambiental y la económica han de ir a la par, no es suficiente con la funcionalidad del bloqueo de protección.

### 2.3. METODOS PARA LA SELECCIÓN DE UN BLOQUEO DE PROTECCIÓN OPTIMIZADO. (Experimento 2).

Destacar que en la actualidad la variable económica, y la variable medioambiental se estudian con modelos ó metodologías independientes. Por ejemplo existen modelos basados en el comportamiento medioambiental de una serie de indicadores asociados a la cadena de suministro (Giannis T. et al., 2008) o herramientas medioambientales fundamentadas en tecnologías limpias que usan índices asociados a materias primas, energía, residuos etc., (Tadeusz F., 2007), modelos con indicadores para la producción que se utilizan para promover negocios sostenibles (Veselea V. et al., 2001) etc. En cuanto al criterio económico, es cierto que se utiliza el life cycle cost (lcc) para poder asociar a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto el coste correspondiente. No obstante no existen una metodología o herramienta que unifique las dos variables la medioambiental y la económica

partiendo de sistemas de embalaje que se consideran funcionalmente viables puesto que el diseño del mismo se ha realizado en función de sus características técnicas, así por ejemplo en el caso de los materiales de amortiguamiento en base a sus curvas de amortiguamiento.

La mayor motivación para desarrollar una metodología de optimización que combine los dos criterios, el medioambiental y el económico, basada en el análisis comparativo de varias alternativas diseñadas de forma que son técnicamente viables (variable funcional) y con la mínima cantidad de material necesaria para satisfacer los requerimientos de protección, es ofrecer a diseñadores y responsables de logística una herramienta que permita la selección de la alternativa más sostenible a partir de soluciones técnicamente seguras.

El interés por la búsqueda de materiales que sean mejores a nivel medioambiental o que permitan reducir la cantidad de material necesaria para alcanzar el objetivo de protección, se ha convertido en una tendencia clave que obliga a los diseñadores de packaging a mejorar los diseños actuales. En esta etapa inicial del proceso de producción es donde los diseñadores de embalaje tienen la posibilidad de mejorar los diseños de manera económica y medioambiental, de ahí la necesidad de desarrollar este tipo de metodologías que permiten una toma de decisiones acertada en busca del diseño más optimizado.

Lo ideal sería que el criterio económico fuera alineado con el medioambiental para un mismo diseño de un material particular, no obstante pueden darse casos en los que sean de signo opuesto de ahí la necesidad de este tipo de metodologías de selección que permitirán tener una puntuación única para cada alternativa como consecuencia de la suma de los valores de los dos criterios considerados. El peso de cada criterio también se puede estimar en base a las preferencias del diseñador.

#### **2.4. MÉTODOS MULTICRITERIO EN LA SELECCIÓN.**

Las Técnicas de Decisión Multicriterio (TDMC) son un grupo de herramientas que abordan la resolución de problemas complejos de una forma más realista que los enfoques tradicionales, permitiendo la incorporación de diferentes criterios y visiones de la realidad. Hay muchas clasificaciones de las TDMC. Siguiendo un criterio basado en el flujo de información entre dos de los actores participantes en el proceso de toma de decisiones, (PTD): decisor y analista, se pueden considerar tres grandes grupos de técnicas:

**1. Técnicas sin información a priori.**

**2. Técnicas con información a priori.** En el segundo grupo se distinguen las técnicas existentes para un número **finito e infinito de alternativas** (técnicas de decisión multicriterio discretas).

A continuación se describen brevemente en qué consisten:

### **1. Técnicas sin información a priori (generadoras):**

- Son aquellas en las que el flujo de información va del analista al decisor.
- El analista estudia objetivamente el problema y obtiene el conjunto de alternativas eficientes que presenta al decisor. Éste elige aquella que más se adecua a su estructura de preferencias que no ha hecho explícita en ningún momento del proceso.
- Con ellas se genera, parcial o totalmente, el conjunto de alternativas eficientes.
- La principal ventaja de este tipo de técnicas es que la única información necesaria del decisor es su opinión de "cuanto más mejor".
- Los inconvenientes más importantes son los asociados a su complejidad calculista en cuanto que el número de criterios considerados se va elevando (prácticamente no se usan con más de tres criterios).
- Entre las técnicas generadoras destacan, (Steuer, R., 1986): el método de ponderaciones, el de la e-restricción y el simplex multicriterio.

### **2. Técnicas con información a priori:**

El flujo de información es en el sentido contrario, del decisor al analista. Estas técnicas exigen que el decisor proporcione al analista su estructura de preferencias, y éste es quién construye el modelo incluyendo en él toda esta información. La solución del problema (decisión) surge del modelo (su resolución) directamente.

El conocimiento explícito de las preferencias del decisor no es sencillo. Se necesita: conocer la propia estructura de preferencias; no cometer errores en el proceso de extracción y de incorporación de la misma. Además el decisor suele modificar sus preferencias a lo largo del proceso de resolución, por lo que deberá establecer determinados controles para retroalimentar el modelo.

**Este grupo de técnicas se suele distinguir según el número de alternativas que tenga el problema: finito o infinito:**

Nota: La descripción de cada uno de estos métodos se desarrolla en los siguientes apartados.

- A. Si el conjunto de alternativas es infinito,** la búsqueda de la solución se efectúa, habitualmente, mediante la **minimización de una distancia (programación por compromiso y programación por metas).**
- B. Si el conjunto de alternativas es discreto (finito) se distinguen:**
- B.1. Métodos de Agregación:** En este tipo de métodos se modelizan las preferencias a través de una función valor:
- B.1.1. Ponderación lineal (SCORING)**
- B.1.2. Directos: Teoría de Utilidad Multiatributo (MAUT)**
- B.1.3. Técnicas basadas en clasificaciones de alternativas**
- B.1.3.1. Método de Arrow – Raynaud.
- B.1.3.2. Análisis Jerárquico (AHP- The Analytic Hierarchy Process-Proceso Analítico Jerárquico).
- B.1.3.3. ANP.
- B.2. Métodos basados en relaciones de orden:** Se modelizan las preferencias a través de un sistema de relaciones binarias. **Métodos de Superación (MS):**
- B.2.1. ELECTRE**
- B.2.2. PROMETHEE**
- B.3. Técnicas básicas, cualitativas y cuantitativas**
- B.3.1. Técnicas básicas:**
- B.3.1.1. Regla conjuntiva.
- B.3.1.2. Eliminación por aspectos.
- B.3.1.3. Regla disyuntiva.
- B.3.2. Técnicas cualitativas:**
- B.3.2.1. La regla de la mayoría.
- B.3.2.2. La regla de Copeland.
- B.3.2.3. La regla de la suma de ratios.
- B.3.2.4. La regla lexicográfica.
- B.3.2.5. El método DATUM (Pugh, 1991).
- B.3.3. Técnicas cuantitativas:**
- B.3.3.1. Técnica de la suma ponderada

### 3. Técnicas interactivas.

El decisor proporciona al analista una información parcial sobre su estructura de preferencias al principio del proceso. Con esta información el analista presenta una alternativa al decisor que éste evalúa y puede aceptar o rechazar. Si se rechaza, da más información al analista sobre sus preferencias, de modo que pueda buscarse una alternativa más aceptable. El intercambio de información es la principal característica de estas técnicas.

No obstante es necesario profundizar en las técnicas de decisión multicriterio discretas dada la casuística de la metodología de selección que se quiere desarrollar en base al criterio medioambiental y criterio económico de la metodología que se quiere desarrollar:

### **Clasificación de las técnicas de decisión multicriterio discretas.**

Los **métodos de Decisión Multicriterio Discreta** se utilizan para realizar una evaluación y decisión respecto de problemas que, por naturaleza o diseño, admiten un número finito de alternativas de solución, a través de:

- 1. Un conjunto de alternativas estable**, generalmente finito (soluciones factibles que cumplen con las restricciones - posibles o previsibles); se asume que cada una de ellas está perfectamente identificada, aunque no son necesariamente conocidas en forma exacta y completa todas sus consecuencias cuantitativas y cualitativas.
- 2. Una familia de criterios de evaluación** (atributos, objetivos) que permiten evaluar cada una de las alternativas (analizar sus consecuencias), conforme a los pesos (o ponderaciones) asignados por el agente decisor y que reflejan la importancia (preferencia) relativa de cada criterio.
- 3. Una matriz de decisión o de impactos** que resumen la evaluación de cada alternativa conforme a cada criterio; una valoración (precisa o subjetiva) de cada una de las soluciones a la luz de cada uno de los criterios; la escala de medida de las evaluaciones puede ser cuantitativa o cualitativa, y las medidas pueden expresarse en escalas cardinal (razón o intervalo), ordinal, nominal, y probabilística.
- 4. Una metodología o modelo de agregación de preferencias** en una síntesis global; ordenación, clasificación, partición o jerarquización de dichos juicios para determinar la solución que globalmente recibe las mejores evaluaciones.
- 5. Un proceso de toma de decisiones** (contexto de análisis) en el cual se lleva a cabo una negociación consensual entre los actores o interesados (analista - "experto"- decisor y usuario)" (Martínez, E. 1998).

**A continuación, se describen las principales TÉCNICAS MULTICRITERIO DISCRETAS:**

#### **B.1. Métodos de agregación:**

##### **B.1.1. Ponderación lineal (scoring).**

Es un método que permite abordar situaciones de incertidumbre o con pocos niveles de información. En dicho método se construye una función de valor para cada una de las alternativas. El método de Ponderación Lineal supone la transitividad de preferencias o la comparabilidad. Es un método completamente compensatorio, y puede resultar dependiente, y manipulable, de la asignación de pesos a los criterios o de la escala de medida de las evaluaciones. Es un método fácil y utilizado ampliamente en el mundo.

##### **B.1.2. Utilidad multiatributo (MAUT).**

Para cada atributo se determina la correspondiente función de utilidad (parcial), y luego se agregan en una función de utilidad multiatributo de forma aditiva o multiplicativa. Al determinarse la utilidad de cada una de las alternativas se consigue una ordenación completa del conjunto finito de alternativas. El método de utilidad multiatributo supone la transitividad de preferencias o la comparabilidad, utiliza "escalas de intervalo", y acepta el principio de "preservación de orden" (rank preservation). La condición de independencia

preferencial mutua entre los atributos suele aceptarse casi axiomáticamente, e implícitamente es cuestionable y no refleja la estructura de preferencias del agente decisor. El rigor y rigidez de los supuestos teóricos de este método usualmente controvertidos y difíciles de contrastar en la práctica, requiere un elevado nivel de información del agente decisor para la construcción de funciones de utilidad multiatributo, aunque permiten abordar fluidamente cuestiones de incertidumbre y riesgo. A pesar de las dificultades en su utilización este método cuenta con una variedad de experiencias prácticas en Estados Unidos e Inglaterra". (Martínez, E., 1998).

### **B.1.3. Técnicas basadas en clasificaciones de alternativas:**

A continuación se describen, este tipo de técnicas basadas en clasificaciones alternativas:

#### **B.1.3.1. Método de Arrow – Raynaud.**

Este método fue propuesto por Arrow y Raynaud en 1986, en su libro *Social Choice and Multicriterion Decision Making* y se basa en la utilización de un algoritmo de clasificación compatible con cinco axiomas de la teoría de la elección social. La aplicación de este método no sólo se utiliza para obtener la alternativa o elección mejor clasificada, sino también para obtener una escala de clasificación de las alternativas. El punto de partida de su análisis es que los métodos multicriterio discretos más conocidos por su falta de una base axiomática satisfactoria, pueden conducir con cierta frecuencia a clasificaciones o rankings de alternativas ya no paradójicas sino arbitrarias. A veces, los resultados obtenidos pueden ser contradictorios a los proporcionados por otros métodos, como por ejemplo el AHP. La idea básica de estos autores consiste en conectar los problemas de elección multicriterio discretos con la teoría de la elección social.

#### **B.1.3.2. Análisis Jerárquico (AHP - The Analytic Hierarchy Process-Proceso Analítico Jerárquico).**

Este método fue desarrollado por el matemático Thomas Saaty y consiste en formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos mediante la construcción de un Modelo Jerárquico.

El propósito del método es permitir que el agente decisor pueda estructurar un problema multicriterio en forma visual, mediante la construcción de un Modelo Jerárquico que básicamente contiene tres niveles: meta u objetivo, criterios y alternativas.

El método AHP fue propuesto por Saaty, (Saaty T.L., 1998) y se basa en la obtención de preferencias o pesos de importancia para los criterios y las alternativas. Para ello, el decisor establece "juicios de valores" a través de la escala numérica de Saaty (del 1 al 9) comparando por parejas tanto los criterios como las alternativas.

Una vez construido el Modelo Jerárquico, se realizan comparaciones de a pares entre dichos elementos (criterios-subcriterios y alternativas) y se atribuyen valores numéricos a las preferencias señaladas por las personas, entregando una síntesis de las mismas mediante la agregación de esos juicios parciales.

El fundamento del proceso de Saaty descansa en el hecho que permite dar valores numéricos a los juicios dados por las personas, logrando medir cómo contribuye cada

elemento de la jerarquía al nivel inmediatamente superior del cual se desprende. Para estas comparaciones se utilizan escalas de razón en términos de preferencia, importancia o probabilidad, sobre la base de una escala numérica propuesta por el mismo Saaty, que va desde 1 hasta 9.

El AHP, mediante la construcción de un modelo jerárquico, permite de una manera eficiente y gráfica organizar la información respecto de un problema, descomponerla y analizarla por partes, visualizar los efectos de cambios en los niveles y sintetizar. El AHP se trata de desmenuzar un problema y luego unir todas las soluciones de los subproblemas en una conclusión (Saaty, T.L., 1998).

### Esquema metodológico del AHP: Estructuración del modelo jerárquico.

Una de las partes más relevantes del AHP, consiste en la estructuración de la jerarquía del problema, etapa en la cual el grupo decisor involucrado debe lograr desglosar el problema en sus componentes relevantes. La jerarquía básica está conformado por: meta u objetivo General, criterios y alternativas.

Los pasos a seguir para la estructuración del modelo jerárquico son:

1. Identificación del Problema;
2. Definición del Objetivo;
3. Identificación de Criterios;
4. Identificación de Alternativas;
  - Meta Global
  - Objetivo
  - Criterios
  - Sub-Criterios

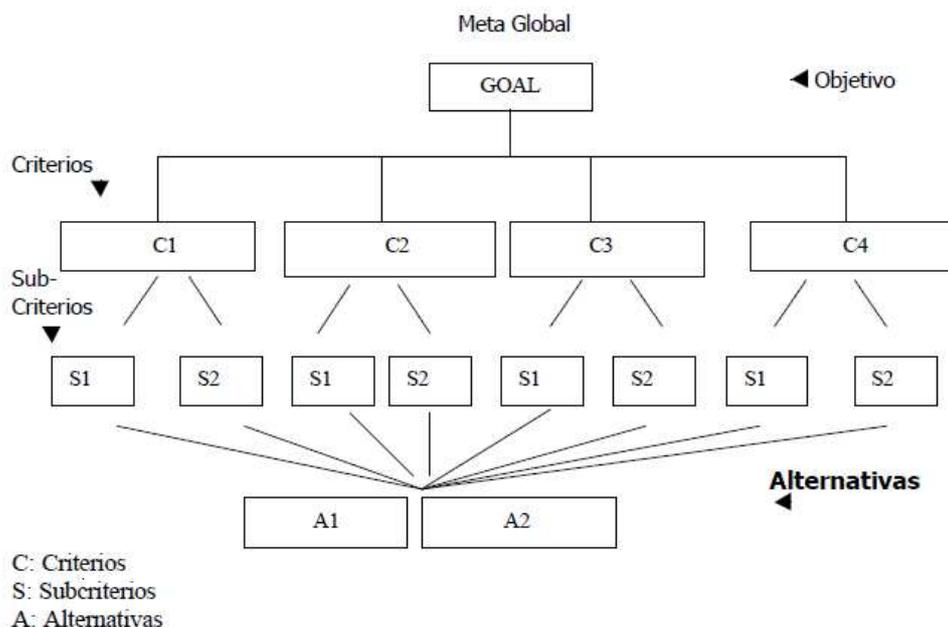


Fig 6. Modelo Jerárquico para la Toma de decisiones con el AHP. Saaty, T.L, 1998.

### Emisión de los juicios y las evaluaciones.

Los juicios son la base del proceso llevado a cabo por AHP. Los juicios pueden estar guiados por información científica, técnica y la dada por la experiencia y conocimientos del grupo decisor útiles para evaluar los diferentes componentes del Modelo. Es esta situación lo que hace al AHP diferente a otros métodos, puesto que dentro de la evaluación del modelo se toman en cuenta los juicios, que en este caso son las opiniones de cada uno de los individuos y/o grupos de interés involucrados en la toma de decisión.

Esta evaluación se realiza por medio de comparaciones binarias (de a pares) frente a un tercer elemento; permite conocer y medir las preferencias de los individuos o grupos de interés (actores) respecto a los diferentes componentes del modelo (criterios, subcriterios, alternativas).

Cada persona expresa su preferencia haciendo la pregunta apropiada mediante los términos Importancia, Preferencia o Probabilidad, asignando un valor numérico, el cual mide la intensidad de su preferencia.

El AHP dispone de una escala creada por el propio Saaty que mide los juicios emitidos por el grupo decisor.

Este paso de la emisión de juicios consiste en que:

Para cada elemento "e" de un nivel de la jerarquía, se comparan de a pares de elementos del nivel inmediatamente inferior, con respecto de su influencia en "e".

Luego se debe encontrar el vector propio asociado al mayor valor propio de la matriz de comparación a pares:

- Vector Propio: Ranking u orden de prioridad
- Valor Propio: Medida de la consistencia del juicio

ESCALA NUMERICA	ESCALA VERBAL	EXPLICACION
1.0	Ambos elementos son de igual importancia.	Ambos elementos contribuyen con la propiedad en igual forma.
3.0	Moderada importancia de un elemento sobre otro.	La experiencia y el juicio favorece a un elemento por sobre el otro.
5.0	Fuerte importancia de un elemento sobre otro.	Un elemento es fuertemente favorecido.
7.0	Muy fuerte importancia de un elemento sobre otro.	Un elemento es muy fuertemente dominante.
9.0	Extrema importancia de un elemento sobre otro.	Un elemento es favorecido, por lo menos con un orden de magnitud de diferencia.
2.0,4.0,6.0,8.0	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	Usados como valores de consenso entre dos juicios.
Incrementos de 0.1	Valores intermedios en la graduación más fina de 0.1 (Por ejemplo 5.2 es una entrada válida).	Usados para graduaciones más finas de los juicios.

Fig 7. Escala de Saaty. Saaty, T.L., 1998.

### **B.1.3.3. El proceso analítico sistémico (ANP).**

ANP fue desarrollado con el objetivo de extender las capacidades de AHP a casos en los que existe interdependencia y retroalimentación entre los elementos del sistema (Saaty, 1996).

El método ANP está compuesto por jerarquías de control, conglomerados (clusters, en inglés), nodos, interrelaciones entre nodos e interrelaciones entre conglomerados. El proceso de modelización puede descomponerse en cuatro etapas que se describirán seguidamente.

En primer lugar, se realizan las comparaciones pareadas y se valoran las ponderaciones relativas. La determinación de las ponderaciones relativas en ANP está basada en la realización de comparaciones pareadas al igual que en AHP. La calificación  $a_{ij}$  en la matriz de comparaciones pareadas  $A$  representa la importancia relativa del elemento situado en la fila  $i$ -ésima respecto del componente situado en la columna  $j$ -ésima, es decir,  $a_{ij} = w_i / w_j$ .

Siguiendo la idea central de AHP, en lugar de realizar una asignación de ponderaciones  $w_i$  y  $w_j$  a los elementos  $i$  y  $j$ , se evalúa el peso relativo  $w_i / w_j$  para cada par de elementos. Una vez realizadas todas las comparaciones, el vector de prioridades  $w$  se calcula por medio de la solución única del sistema:  $Aw = \lambda_{\max} w$ , donde  $\lambda_{\max}$  es el autovalor principal de  $A$  y  $\sum_i w_i = 1$ , la normalización modo distributiva que garantiza la unicidad. AHP y ANP permiten valorar la inconsistencia en la emisión de juicios mediante el índice de consistencia (IC) que viene dado como:  $IC = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ . Si la razón de consistencia,  $RC = IC/IC(A)$ , donde  $IC(A)$  es el índice de consistencia aleatorio (promedio) obtenido al simular juicios de  $A$  en la escala de Saaty, es menor que 0,1, la consistencia suele considerarse aceptable (Saaty, 1980).

A continuación debe obtenerse la supermatriz inicial, colocando las ponderaciones dentro de una matriz que traduce las interrelaciones entre todos los elementos del sistema.

Posteriormente, debe generarse la supermatriz ponderada, transformando la supermatriz inicial en una matriz donde cada una de sus columnas sume uno (estocástica por columnas). Para ello cada uno de los elementos incluidos en un bloque de la supermatriz se multiplica por la ponderación asociada al conglomerado. El autovector obtenido a partir de las comparaciones en el nivel conglomerado se emplea para ponderar los bloques asociados a los conglomerados.

Finalmente, se tienen que calcular de los vectores y ponderaciones de prioridad globales. La supermatriz ponderada se eleva a potencias sucesivas (Saaty T.L., 1996) con el fin de obtener los vectores de prioridad globales (A. Toncovich et al., 2007).

## **B.2. Métodos de superación.**

Estos métodos usan como mecanismo básico el de las comparaciones binarias de alternativas, es decir comparaciones dos a dos de las alternativas, criterio por criterio. De esta forma puede construirse un coeficiente de concordancia  $C_{ik}$  asociado con cada par de alternativas  $(a_i, a_k)$ .

### **B.2.1. Electre.**

El método ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité), en todas sus versiones es conocido no sólo en Francia, sino en toda Europa, demostrándolo así en la abundante literatura sobre ellos y sus aplicaciones (Barba Romero S., et al. 1.997).

El concepto de peso en los métodos ELECTRE debe entenderse como una medida de la importancia que para el decisor tiene ese criterio, pero en absoluto como una tasa de sustitución, ya que las evaluaciones de cada alternativa en los diferentes criterios no se componen en una evaluación global. Por tanto, estos métodos no son compensatorios en el sentido de los métodos de ponderación lineal. Pero como sí utilizan la información de los pesos a fin de construir los coeficientes de concordancia y de discordancia, suelen catalogarse en definitiva, como métodos parcialmente compensatorios. El ELECTRE IV es el único que ni siquiera necesita pesos, pues funciona por una secuencia de relaciones de superación anidadas que va construyendo en forma paramétrica. Las versiones ELECTRE I e IV dan como resultado una relación de superación entre las alternativas, mediante un grafo orientado de las mismas y sensible a los umbrales fijados por el decisor. A partir de esta relación puede extraerse la información útil para la selección buscada. Las otras versiones del ELECTRE dan directamente un preorden parcial de las alternativas.

Existen diferentes versiones ELECTRE I, II, III, IV, V y VI de muy diverso cariz entre sí.

### **B.2.2. Promethee.**

El método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) nace de la mano de Brans (Brans J.P., et al 1.984). A partir de entonces empiezan a aparecer numerosas aplicaciones con un especial interés en los problemas de ubicación: plantas hidroeléctricas, instalaciones comerciales en un ambiente competitivo, depósitos de desechos, evaluación financiera, etc. Uno de los objetivos esenciales del método es el de ser fácilmente comprensible para el decisor, siendo en realidad uno de los más intuitivos de la decisión multidiscreta.

El método PROMETHEE posee una definición axiomática que permite caracterizarlo como un método de agregación que satisface condiciones de neutralidad (el preorden agregado no se ve influido por el número de alternativas), monotonía (el preorden social se comporta en el buen sentido cuando el número de sujetos que prefieren una alternativa a otra aumenta), y otras condiciones algo más complejas, (Bouyssou D et al, 1.990).

Resaltar la existencia de las versiones PROMETHEE I, II, III, IV, V y VI de muy diverso cariz entre sí.

### **B.3. Técnicas básicas, cualitativas y cuantitativas.**

A continuación se describen:

#### **B.3.1. Técnicas básicas:**

##### **B.3.1.1. Regla conjuntiva.**

Consta de tres pasos:

- Determinar para cada criterio un cierto nivel de aspiración.
- Examinar de manera aleatoria todas las alternativas.
- Elegir la primera alternativa que cumpla con todos los niveles de aspiración.

##### **B.3.1.2. Eliminación por aspectos.**

Se realizan los siguientes pasos:

- Se establece un cierto nivel de aspiración para cada criterio (unos mínimos).
- Se examinan las distintas alternativas para cada criterio en orden de importancia del criterio (por filas).
- Cada vez que las alternativas no satisfagan el nivel de aspiración se eliminarán.
- El proceso finaliza cuando han sido eliminadas todas las alternativas excepto una, que es la que se elige.

##### **B.3.1.3. Regla disyuntiva.**

Se realizan los siguientes pasos:

- Identificar cada alternativa con su mejor propiedad (en general una propiedad distinta para cada alternativa).
- Elegir la alternativa según la que se considere más importante de todas las mejores propiedades.

#### **B.3.2. Técnicas cualitativas.**

Son técnicas en las cuales se mide el grado de satisfacción de los distintos criterios en una escala ordinal y se clasifican los criterios por orden de importancia. Al utilizar un método de tipo cualitativo sucede lo siguiente:

- Las puntuaciones obtenidas no se pueden sumar, pues están definidas en una escala cualitativa.
- Las posiciones en dicha escala sólo dan información de su clasificación frente a las otras alternativas y no sobre las diferencias absolutas en eficiencia entre las propiedades evaluadas de cada alternativa.

A continuación se describen los más relevantes:

#### **B.3.2.1. La regla de la mayoría.**

Se elige la alternativa más efectiva para el mayor número de criterios. Para ello se comparan las alternativas de dos en dos y se elige la mejor de cada pareja. La dificultad de esta técnica radica en que para cada criterio se elige la mejor alternativa de entre dos, independientemente de la diferencia de posiciones que haya entre ellas. Por eso si la diferencia entre propiedades de las alternativas es grande, la regla de la mayoría no es realista.

#### **B.3.2.2. La regla de Copeland.**

Se trata de una variante de la regla de la mayoría que evita el problema de la no transitividad del ranking de alternativas. La regla dice que el número de veces que una alternativa, en comparación con las otras, tiene preferencia de acuerdo con la regla de la mayoría, es una medida para el valor de la alternativa. Esta regla fuerza a establecer un ranking de alternativas, aunque de todos modos no tienen en cuenta la distancia entre dos posiciones.

#### **B.3.2.3. La regla de la suma de ratios.**

Se trata de sumar para cada alternativa todos los ratios obtenidos. De este modo también se obtiene una clasificación de las distintas alternativas.

#### **B.3.2.4. La regla lexicográfica.**

Se trata de clasificar los criterios en función de su importancia relativa para evaluar las alternativas respecto al criterio más importante. De este modo se elige la alternativa que cumpla mejor el primer criterio, independientemente de cómo satisfaga el resto de los criterios. Solo en el caso de que más de una alternativa satisfaga de igual manera el primer criterio, se evalúa cuál de ellas satisface mejor el segundo criterio y así sucesivamente.

#### **B.3.2.5. El método DATUM (Pugh, 1994).**

Es una alternativa de los métodos cuantitativos, desarrollados por Pugh como una variación informal de la regla de la mayoría. Se realiza en las siguientes etapas:

- Elegir una de las soluciones alternativas como DATUM o base de comparación.
- Compara la adaptación a cada objetivo de cada solución alternativa en relación con el Datum. Si la solución cumple mejor que el objetivo, se coloca un (+), si se adapta peor se pone (-) y si no existe gran diferencia en su adaptación se pone un (=).
- Calcular por separado la suma de signos (+), de signos (-) y de (=) para cada alternativa y estos resultados sirven de base para tomar una decisión suficientemente fundamentada.

Muchas veces suele ser necesario elegir un nuevo Datum y repetir los pasos 3 y 4 para clasificar mejor las ideas.

### **B.3.3. Técnicas cuantitativas.**

En todos los métodos de tipo cualitativo parece que existen problemas a la hora de tomar decisiones. La dificultad principal es que los datos ordinales no se pueden sumar para obtener una puntuación total. Este problema no surge si el valor de la síntesis se deja para el que toma la decisión, como el caso del método de Pugh, pero entonces puede ser que esta persona tenga dudas debido a que existen demasiados criterios y/o demasiadas alternativas. Por todo ello surge un método en el cual se mide el grado de satisfacción de los distintos criterios en una escala cardinal, permitiendo al responsable de la toma de decisiones cuantificar sus juicios de valor sobre la eficiencia de las alternativas y la importancia de los criterios en una escala de intervalos conocidos. Existen multitud de métodos cuantitativos de ayuda a la decisión, pero la mayoría de ellos entrañan una compleja resolución numérica.

#### **B.3.3.1. Técnica de la suma ponderada.**

Se trata de una técnica basada en dotar a las alternativas y criterios de diferencias cuantificables, expresados en función de unas escalas. Para valorar los criterios es necesario realizar un análisis de los factores de entorno que inciden y de algún modo condicionan el proceso.

La elección de los factores a considerar constituye el primer paso. Existen diferentes fuentes, planteamientos, clasificaciones etc, que pueden asistir al equipo de trabajo a la hora de establecer un listado de los principales factores de influencia detectados.

Los pesos de los criterios tienen como objeto representar la importancia relativa que la unidad decisoria otorga a cada criterio. El problema clave que se plantea en este punto es responder a cómo asignar un valor numérico a cada criterio que represente, del modo más ajustado, la preferencia del decisor de un criterio frente a otro.

Existen dos estrategias:

- Asignación directa: frente a una escala definida que correlaciona valores de grado con valores numéricos.
- Asignación indirecta: Mediante técnicas de comparación entre criterios.

Una vez determinada la ponderación de los criterios, procedemos a la valoración de cada alternativa frente a cada criterio. Esta se traduce en el establecimiento de una correspondencia entre el valor cualitativo que el decisor de una alternativa respecto de un criterio determinado y un valor numérico: la definición de una función de utilidad. Para ello podemos utilizar los mismos tipos de asignación que se han descrito para los criterios.

De este modo se consigue que la eficiencia para cada criterio se puntúe en una única escala.

## **2.5. EVALUACIÓN AMBIENTAL DE EMBALAJES.**

La globalización económica, ha propiciado un aumento del tráfico de mercancías a grandes distancias, siendo cada vez más frecuente la exportación de materias primas hacia mercados más lejanos. En este sentido la logística y en consecuencia los sistemas de envase y embalaje utilizados para la distribución de productos tienen cada vez una mayor importancia dentro de las actividades industriales y de la cadena de valor asociada.

Por lo tanto se han elevado el número de envases y embalajes empleados en las etapas de transporte, distribución y uso, lo cual hace que éstos sean una de las causas que más ha incrementado la cantidad de residuos sólidos (Rieradevall J. et al., 2000). Este hecho ha derivado en un fuerte desarrollo legislativo que afecta a los envases y sus residuos y que culminó con la publicación de la Directiva 94/62/CE de envases y residuos de envase modificada por la Directiva 2004/12/CE y transpuesta a la legislación española por el Real Decreto 252/2006. A nivel europeo la legislación más reciente en cuanto a envases se recoge en la Directiva 2013/2/UE.

Con todo, a los envases se les ha exigido no únicamente que cumplan con los requisitos técnicos y de calidad tradicionales sino también con requisitos medioambientales.

El sector del envase y embalaje está presente en prácticamente todos los sectores económicos. Además, en los actuales mercados globales cada vez más competitivos los envases y embalajes juegan un papel protagonista, siendo un elemento protector del producto y que permite al producto contenido diferenciarse con respecto a los de la competencia, (vendedor silencioso) (Sonneveld K., 2000). Este es también uno de los principales retos empresariales; sacar el máximo partido a las ventajas que ofrecen los envases como vías de comunicación, como herramienta estratégica y de marketing (Rundth B., 2005).

Como consecuencia de la diversidad de productos a los que van destinados aparece una gran oferta de materiales de envase y embalaje. Tradicionalmente a la hora de tomar una decisión en la elección entre un material de envase u otro se analizan factores como: costes, seguridad, funcionalidad, calidad y estética. No obstante en la actualidad un nuevo factor comienza a formar parte de esta decisión y es el factor ambiental. A este respecto, en el actual sistema económico, el mercado tiende a primar a las empresas que logran integrar en su oferta los valores sociales emergentes. Es indudable que entre esos nuevos valores destaca la protección del medio ambiente, exigida de forma creciente por los consumidores (Generlitat Valenciana, 1999).

La toma de decisiones en la elección de un envase u otro considerando únicamente los factores tradicionales puede resultar en algunos casos difícil. Incluso cuando se trata de distintos materiales de envase esta decisión, atendiendo únicamente a requisitos funcionales, puede ser complicada puesto que a pesar de considerar materiales distintos puede darse el caso de que cumplan la misma función con leves diferencias. Sin embargo, si

además de los factores tradicionales se considera el nuevo factor ambiental la elección puede resultar más sencilla, ya que en ocasiones dicho factor ambiental es clave para tomar una decisión. En algunos casos puede incluso resultar difícil y discutible qué envase es mejor que otro, cuál es más respetuoso con el medio ambiente y cuál no lo es tanto. Asimismo esta información tal y como es transmitida a través de los envases y embalajes puede resultar también confusa.

Las investigaciones encontradas con este mismo objetivo estudian la variable económica, la funcional y la medioambiental de forma individual, sin existir una metodología que involucre a estos tres requerimientos. Así por ejemplo existen metodologías para la toma de decisiones basadas en indicadores medioambientales, aplicados a las cadenas de suministro (Giannis et al., 1998), herramientas dirigidas a tecnologías más respetuosas con el medio ambiente, basadas en flujos de energía de materia, utilizando perfiles que incluyen materias primas, energía, residuos, producto e incluso embalaje. (Tadeusz et al., 2007), indicadores de producción sostenible, desarrollados para promover la sostenibilidad empresarial (Veselea et. Al., 2001), entre otros. Lo más próximo puede ser la integración del Life cost analysis y el Life Cycle analysis (LCA), en la decisión sobre varios escenarios de diseño (Gregory et al., 2001).

Actualmente y teniendo en cuenta la tendencia hacia la protección ambiental que se está imponiendo tanto en las empresas como en la sociedad en general, los nuevos requerimientos legislativos relativos a los envases y sus residuos, así como la búsqueda de nuevos materiales que resulten más adecuados desde el punto de vista ambiental y de la sostenibilidad de los recursos, es lógico que se considere necesario el análisis en detalle de las ventajas e inconvenientes ambientales de determinados materiales de envase y embalaje.

La legislación y los consumidores / clientes son principales impulsores del diseño enfocado al medio ambiente (Tang Y.K., et al, 2006). Sin embargo, y dado que el factor ambiental no es el único que se debe considerar en la toma de decisiones, en la elección entre un envase u otro, se debe incluir además un análisis de las características funcionales de cada uno de ellos y un análisis económico.

En los últimos años ha aumentado el interés en el desarrollo de herramientas y métodos para cuantificar y reducir los impactos ambientales que provocan los productos y sus residuos. Al mismo tiempo, se ha producido un cambio conceptual orientado a considerar el ciclo de vida completo del sistema. Por tanto se hace necesario el desarrollo de una metodología potente, sistemática y objetiva, capaz de evaluar la incidencia ambiental de un producto, proceso o actividad desde la perspectiva del ciclo de vida completo del mismo.

El Análisis de ciclo de vida (ACV) (UNE-EN ISO 14040:1998) es, en la actualidad, la herramienta más avanzada para satisfacer este propósito, ya que permite evaluar los impactos producidos por un producto, proceso o actividad durante todo su ciclo de vida. El

concepto de Ciclo de Vida (desde la cuna a la tumba), describe las fases que tienen lugar en la vida de un producto, desde que se extraen las materias primas para su fabricación hasta la utilización por parte del usuario de ese producto y el tratamiento posterior de los residuos, los cuales por medio del reciclado de material u otros procesos, pueden convertirse en componentes o en materia prima de nuevos productos.

Como consecuencia de la difusión de la técnica de Análisis de Ciclo de Vida se han desarrollado una serie de normas que describen los principios y la estructura de estos estudios.

Estas normas son:

- ✓ UNE –EN ISO 14040:2006. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia.
- ✓ UNE – EN ISO 14044:2006. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices.
- ✓ UNE – EN ISO 14045:2012. Gestión ambiental. Evaluación de la ecoeficiencia del sistema del producto. Principios, requisitos y directrices.
- ✓ UNE – EN ISO 14046:2014. Gestión ambiental. Huella de agua. Principios, requisitos y directrices.

Además del impacto ambiental asociado al consumo cada vez mayor de envases y embalajes, hay que considerar los costes no sólo de producción de los mismos, sino también los asociados al transporte y la gestión de su fin de vida, ya que una vez que dejan de ser aptos para realizar su función, se convierten en residuos que hay que gestionar. El desarrollo sostenible ha sido incorporado a varios niveles en la sociedad en los últimos años (Ness B. et al., 2007). La definición estándar de la comisión Brundtland, para el desarrollo sostenible es aquel que asegura la resolución de las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de generaciones futuras (WCED., 2006). De ahí la necesidad de obtener un indicador medioambiental para los diseñadores, que evalúen el comportamiento medioambiental (Bovea M.D et al, Material and design 27, 2006). A la hora de elegir entre varias posibilidades de envase que pueden diferir en cuanto a material y diseño, no sólo será importante considerar sus características o requisitos técnicos o su impacto ambiental, sino también el coste total asociado a cada uno. Por ello será necesario realizar un estudio de los costes asociados a las distintas etapas que componen el ciclo de vida de los envases y/o embalajes.

Es posible observar movimientos del mercado hacia una postura más crítica y rígida en cuanto a los productos y procesos que han de ser medioambientalmente amigables. Esto supone que aquellos que desarrollen procesos y productos bajos en impactos medioambientales asociados tendrán mayores oportunidades de negocio (ventaja competitiva) (Borchardt M. et al, 2011).

### 3. OBJETIVOS E HIPOTESIS.

La presente tesis doctoral tiene como objetivo global el desarrollar metodologías que en definitiva permitan caracterizar, diseñar y seleccionar aquellos bloqueos de protección de material de amortiguamiento optimizados (calculados y diseñados previamente en función del grado de severidad del entorno de distribución; variable funcional) en función de los siguientes dos criterios:

- a. Criterio económico (variable económica); ha de proporcionar la protección necesaria con el menor coste asociado al embalaje, así como a la etapa de transporte y almacenamiento del embalaje con o sin producto ( $C_2$ )
- b. Criterio medioambiental (variable medioambiental); el bloqueo óptimo ha de provocar los mínimos impactos medioambientales asociados a sus etapas del ciclo de vida ( $C_1$ )

Con el fin de poder alcanzar el objetivo de esta tesis, se han planteado una serie de hipótesis principales y de trabajo, para cada uno de los dos experimentos llevados a cabo, relacionadas con la problemática identificada en el proceso de desarrollo y selección del sistema de protección óptimo de un producto: la ausencia de una metodología de diseño y selección basada en la estimación de tres variables clave, estudiadas de una forma rápida y consistente.

La variable funcional (requisito primordial) es un requerimiento a cumplir por los embalajes de protección, previamente al proceso de selección atendiendo a los dos criterios: medioambiental y económico.

Las tres variables serán determinadas para cada caso de estudio, mediante herramientas y/o metodologías científico – técnicas específicas.

#### 3.1. OBJETIVOS.

Dado que la metodología de selección a desarrollar comprende tres variables diferentes que son necesarias estimar para cada alternativa de diseño, a partir de las herramientas propuestas para cada una de ellas en esta tesis, el objetivo global se desglosa en objetivos específicos vinculados a cada una de las variables a determinar o de las herramientas propuestas.

**El objetivo global planteado se desglosa en los siguientes objetivos:**

- 1. Estudio comparativo de la fiabilidad de las curvas de amortiguamiento resultantes de los métodos simplificados:** método de Michael Sek y del método de Gary Burgess, frente a las obtenidas siguiendo el método tradicional recopilado en la norma ASTM D1596.

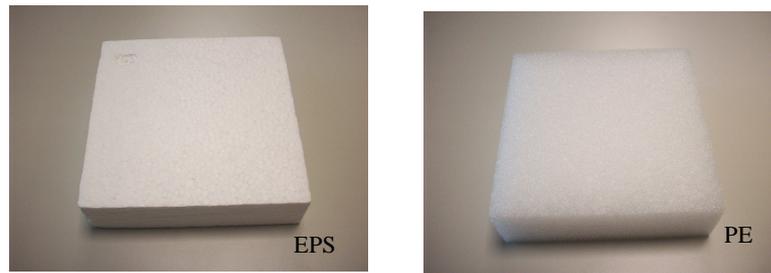


Fig 8. Muestras de 15 × 15 cm y 5 cm de espesor de las diferentes espumas.

- 2. Determinación de las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos simplificados estudiados y ensayados.** Determinación de las limitaciones de cada uno de los métodos simplificados. Dado que se obtendrán las curvas de amortiguamiento de diferentes tipologías de materiales, se podrá establecer la idoneidad, para cada uno de los materiales objeto de estudio, para cada uno de los dos métodos.
- 3. Determinación las limitaciones del método simplificado de Michael Sek** de compresión a alta velocidad. Comprobar la necesidad de desarrollar un dispositivo para el aumento de la velocidad, con el fin de evitar el cálculo del factor dinámico de velocidad, mediante el algoritmo de mínimos cuadrados (ILMS), para poder corregir los efectos dinámicos de la compresión y así poder determinar la aceleración máxima de un impacto.
- 4. Desarrollo de una máquina de caracterización de los materiales de amortiguamiento siguiendo las pautas recogidas en la norma ASTM D1596,** pero mejorando considerablemente la fiabilidad de los resultados frente a los obtenidos con la máquina de cushion existente en el mercado, ya que permitirá reducir los tiempos de ensayo, y mejorar la precisión de los resultados obtenidos para la elaboración de las curvas de amortiguamiento, como consecuencia de su grado de automatización con respecto a la máquina de caracterización tradicional. Igualmente se utilizará la programación del hardware de adquisición de datos del equipo mediante Labview®.
- 5. Validación de las mejoras indicadas anteriormente con la máquina de cushion desarrollada por ITENE, mediante su uso para la obtención de las curvas de amortiguamiento.** Validación de materiales.
- 6. Desarrollo de un método para la selección del material de amortiguamiento óptimo para la protección de un producto, teniendo en cuenta su capacidad para proteger al producto: características amortiguantes (curvas de amortiguamiento), comportamiento medioambiental y costes asociados a lo largo de todo su ciclo de vida.**

- 7. Estudio comparativo del comportamiento medioambiental de materiales de amortiguamiento a lo largo de su ciclo de vida**, contemplando cada una de las etapas del ciclo de vida de los materiales desde la etapa de extracción de las materias primas para su fabricación, hasta la etapa de disposición final donde las protecciones interiores dejan de realizar su función y se convierten en un residuo. La metodología utilizada para el análisis de ciclo de vida es del SETAC, con el programa SimaPro 7.0.2. de PRÉ Consultants, para realizar los cálculos así como las bases de datos sobre el impacto asociado al procesamiento de materias primas, fabricación del bloque, transporte y tratamiento de residuos.
- 8. Desarrollo de un modelo de costes** que a su vez depende de una serie de variables: costes de las materias primas, costes del proceso de transformación, fabricación etc, costes asociados al transporte, almacenamiento de las espumas de amortiguamiento principalmente.

### **3.2. HIPOTESIS.**

Las hipótesis planteadas necesarias para alcanzar el objetivo, se han de ir contrastando en el proceso de investigación, que tal y como se ha indicado en la introducción se divide en dos experimentos que pretenden el desarrollo de la metodología de selección que comprenda las tres variables funcional, medioambiental y económicas, las cuales se han de determinar para cada alternativa de diseño con el menor tiempo y coste asociados y donde el proceso de selección se fundamenta en los dos criterios, medioambiental (C1) y económico (C2).

En este proyecto se han planteado dos tipos de hipótesis, hipótesis principales (HP) e hipótesis de trabajo (HT).

Las hipótesis principales (HP), se plantean con el fin de poder demostrarlas mediante las diferentes investigaciones objetivo del presente proyecto. A su vez las hipótesis principales se sustentan en una serie de hipótesis de trabajo (H.T.) que desarrollan y amplían el enfoque de las principales y sirven como punto de partida para futuras investigaciones.

Las hipótesis principales que se presentan a continuación, en el área del diseño y desarrollo de un sistema de embalaje optimizado, especialmente en cuanto a materiales de amortiguamiento se refiere, dentro de la Ingeniería del embalaje son:

**H.P. 1.** Elevada fiabilidad de las curvas de amortiguamiento desarrolladas por los métodos abreviados (M. Sek, Burgess) frente al estándar, recopilado en la norma ASTM D1596. Estimación de la desviación de los resultados de los métodos abreviados frente al estándar (cálculo de errores).

**H.P. 2.** Los tiempos necesarios para la obtención de las curvas de amortiguamiento de un material de embalaje, siguiendo el método de la norma estándar ASTM D1596, se pueden

reducir considerablemente, mediante el uso de métodos simplificados como el método de M. Sek y método de Burgess. Al reducirse los tiempos se reducen costes y aumenta la reproducibilidad de los resultados.

**H.P. 3.** La fiabilidad del método desarrollado por Burgess, frente al método de M. Sek y a la norma ASTM D 1596, depende de las características del material de amortiguamiento, en función de las cuales se ajusta en mayor o menor medida el modelo exponencial propuesto por el autor (Burgess).

H.T. 3.1. Los métodos simplificados no presentan el mismo grado de idoneidad para todos los materiales de amortiguamiento, dependiendo de la naturaleza del material se adaptará o ajustará con mayor fiabilidad a uno de los dos métodos abreviados; Método de M. Sek y el Método de Burgess.

H.T. 3.2. El porcentaje de error máximo y medio del método de Burgess, depende del número de puntos seleccionados para realizar el ajuste de la curva y de la distancia existente entre los puntos seleccionados.

**H.P. 4.** Las propiedades de amortiguamiento de un material de embalaje se pueden obtener a partir de sus características de compresión, tal y como se describe en el método desarrollado por Michael Sek.

H.T. 4.1. Si la velocidad del ensayo de compresión de un material de amortiguamiento es como mínimo el 11 % de la velocidad esperada desde una altura de caída dada, el factor dinámico de la velocidad que corrige los efectos dinámicos, puede asumirse cercano a la unidad, evitando su cálculo mediante un algoritmo de mínimos cuadrados.

**H.P. 5.** La reproducibilidad del método de M. Sek es mayor que la del método de Burgess.

**H.P. 6.** El material de amortiguamiento óptimo a seleccionar para la protección de un producto frente a los riesgos derivados de su ciclo de distribución, una vez se diseñe para proteger al producto (propiedades de amortiguamiento; cushion curves), dependerá del criterio de costes (coste de la materia prima, del proceso de transformación, de los transporte asociados etc), y del criterio medioambiental (impactos medioambientales derivados de cada una de las etapas del ciclo de vida del producto).

H.T. 6.1. Los bloqueos de material de amortiguamiento con mejoras en su comportamiento medioambiental, no siempre van en paralelo con reducciones en el coste.

H.T. 6.2. Actualmente es difícil de encontrar una alternativa al poliestireno expandido (EPS) como consecuencia de las propiedades de amortiguamiento del (EPS) y teniendo

en cuenta que es uno de los materiales más económicos, de ahí su gran uso como material de protección y amortiguamiento.

H.T. 6.3. El poliestireno expandido dada su difícil recogida una vez que se convierte en residuo, presenta impactos negativos en su etapa de disposición final, pese a que en los últimos tiempos se han puesto en marcha operaciones para su reciclado, entre ellas la valorización energética, su introducción como materia secundaria en nuevos procesos de fabricación etc.

#### **H.P 7. Dependencia del modelo de costes, del diseño del material de amortiguamiento.**

H.T 7.1. El coste de un bloque de material amortiguante depende no sólo del precio de la materia prima y del proceso utilizado para su fabricación, sino también de una serie de costes que dependen de forma indirecta del diseño optimizado del material: grado de optimización del espacio d carga en el transporte y en el almacén, etc.

**H. P.8.** El peso de los criterios de selección considerados al aplicar la metodología, modifica el resultado en función de los porcentajes considerados.

#### **4. MATERIALES Y MÉTODOS.**

En la presente tesis doctoral se han desarrollado dos trabajos de investigación, en los que se detallan los experimentos, con sus materiales y metodologías utilizadas para cada una de ellas. Para una mejor comprensión de este apartado de materiales y métodos, a continuación se indica el objetivo principal e hipótesis que son estudiados en los dos trabajos de investigación:

**Experimento 1.** Estudio de la fiabilidad de las curvas de amortiguamiento resultantes de los métodos simplificados: método de Michael Sek y del método de Gary Burgess, frente a las obtenidas siguiendo el método tradicional recopilado en la norma ASTM D1596, aceptado industrialmente, aplicado a espumas de célula cerrada. Se utilizará como materiales el EPS (15 kg/m<sup>3</sup>) y Etafoam® (29 kg/m<sup>3</sup>).

✓HP 1, HP2, HP3 (H.T. 3.1., H.T. 3.2.), HP4 (H.T. 4.1.), HP5.

**Experimento 2.** Desarrollo de un método para la selección del material de amortiguamiento óptimo para la protección de un producto, teniendo en cuenta su capacidad para proteger al producto: características amortiguantes (curvas de amortiguamiento), comportamiento medioambiental y costes asociados a lo largo de todo su ciclo de vida.

✓HP 6 (H.T. 6.1., HT6.2., H.Y. 6.3.), HP7 (H.T. 7.1.), H.P.8.

**4.1. EXPERIMENTO 1.** Estudio comparativo de la fiabilidad de las curvas de amortiguamiento resultantes de los métodos simplificados: método de Michael Sek y del método de Gary Burgess, frente a las obtenidas siguiendo el método tradicional recopilado en la norma ASTM D1596, aceptado industrialmente, aplicado a espumas de célula cerrada. Se utilizará como materiales el EPS (15 kg/m<sup>3</sup>) y Etafoam® (29 kg/m<sup>3</sup>).

A continuación se indican los métodos e instrumentación utilizada para poder alcanzar el objetivo de la investigación:

- **Método ASTM D1596**

Standard test method for Dynamic Shock cushioning characteristics of packaging. ASTM D1596. Este es el método tradicionalmente utilizado para la determinación de las curvas de amortiguamiento de los materiales de embalaje. Está basado en la medida de la aceleración máxima registrada sobre las muestras de material, en el impacto de una carga estática desde una altura determinada. Con el fin de obtener las curvas de amortiguamiento de las espumas de EPS, PE - Etafoam®, el experimento fue diseñado

con muestras de 15 x 15 cm de área, 6 tensiones estáticas y 7 alturas de caída, con un único espesor de material: 50 mm (un total de 42 muestras/material).

Las muestras eran de 15 × 15 cm (ASTM D 1596) y 50 mm de espesor y con las siguientes densidades;

- **EPS (15 kg/m<sup>3</sup> ),**
- **Etafoam® (29 kg/m<sup>3</sup> ).**

Las densidades y espesor utilizados se seleccionaron, por ser de las más habituales en este tipo de bloqueos. Para ello se entrevistaron a varios proveedores: fabricantes y transformadores de estos materiales de amortiguamiento.

Las alturas seleccionadas:

- 30.5 cm
- 45.7 cm
- 61.0 cm
- 76.2 cm
- 91.4 cm
- 106.7 cm

Las cargas estáticas:

- ✓ 2.55 KPa
- ✓ 3.83 KPa
- ✓ 5.10 KPa
- ✓ 6.28 KPa
- ✓ 7.55 KPa
- ✓ 10.10 KPa

Finalmente las alturas y cargas estáticas seleccionadas para realizar la determinación de las curvas de amortiguamiento, son el resultado de una serie de pruebas preliminares, realizadas con el fin de que los puntos resultantes fueran significativos y suficientes para poder trazar la curva de amortiguamiento de estos materiales.

En la siguiente tabla a modo de resumen se presenta el experimento que se ha llevado a cabo para cada uno de los materiales de amortiguamiento:

*Tabla 1. Resumen del experimento para determinar las curvas de amortiguamiento en el experimento 1.*

espesor (cm) espuma	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	h5 (cm)	h6 (cm)	carga estática (KPa)
5	30.5	45.7	61.0	76.2	91.4	106.7	2.55
5	30.5	45.7	61.0	76.2	91.4	106.7	3.83
5	30.5	45.7	61.0	76.2	91.4	106.7	5.10
5	30.5	45.7	61.0	76.2	91.4	106.7	6.28
5	30.5	45.7	61.0	76.2	91.4	106.7	7.55
5	30.5	45.7	61.0	76.2	91.4	106.7	10.10

### Máquina de caracterización del material de amortiguamiento

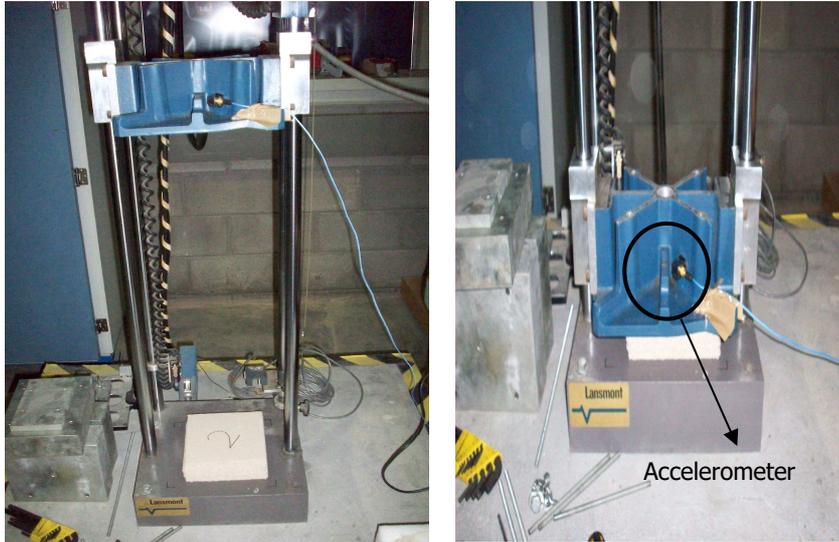


Fig 9. Máquina de amortiguamiento + acelerómetro.

- **Método Tensión – Energía (Tensión dinámica versus energía dinámica) de Gary Burgess.**

Las propiedades de amortiguamiento de un material de embalaje, mediante este método, se describen como la relación existente entre las variables específicas de carga estática, altura de caída, espesor del material, y el nivel de aceleración (G). El resultado es una ecuación que genera las curvas de amortiguamiento para un material específico de embalaje. Este método genera las curvas de amortiguamiento de los materiales poliméricos, basándose en el conocimiento de la tensión dinámica y la densidad de energía, que se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$y = ae^{bx}$$

Donde:

$y$  = Tensión dinámica =  $Gs$

$x$  = Energía dinámica =  $sh/t$

$s$  = carga estática

$h$  = altura de caída

$t$  = espesor de la espuma

$G$  = aceleración

Tal y como describe el autor sólo se necesitarían 8 - 10 muestras de cada material con las mismas dimensiones y densidades utilizadas en los anteriores métodos.

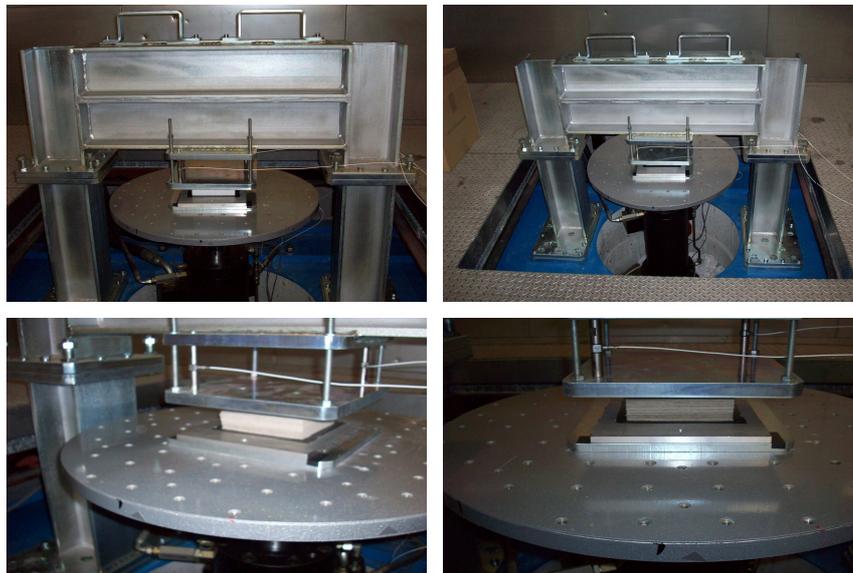
- **Método de Michael Sek.**

En este método las curvas de amortiguamiento, se determinan a partir de las características de compresión estática del material de amortiguamiento. Se determina un factor dinámico mediante el método iterativo de mínimos cuadrados (iterative least mean squares (ILMS) optimization technique), con el fin de reducir la discrepancia entre el pico de aceleración predecida por el modelo teórico y el medido mediante el test de impacto.

Una vez que se determine el factor dinámico, la aceleración de un impacto se puede predecir a partir de la compresión, siempre que se corrijan los efectos dinámicos de la misma, mediante el mencionado factor dinámico.

El diseño del experimento se realizó, utilizando la máxima velocidad que el equipo permitía (velocidad próxima a 0.425 m/s), con el fin de que el factor de velocidad fuera lo más próximo a uno, evitando el tener que calcular por lo tanto el factor de velocidad que corrija los efectos dinámicos, mediante el método iterativo de mínimos cuadrados. En este método únicamente se utilizaron 3 muestras por material, con las mismas dimensiones y densidades que en el método anterior para obtener un resultado representativo.

**Máquina de compresión rápida** (diseñado por ITENE con el fin de alcanzar una velocidad cercana a 0.425 m/s), en un ensayo de compresión; curva tensión – deformación:



*Fig 10. Máquina de compresión rápida.*

A continuación, se muestra en detalle el equipamiento necesario para llevar a cabo el ensayo de compresión a alta velocidad:

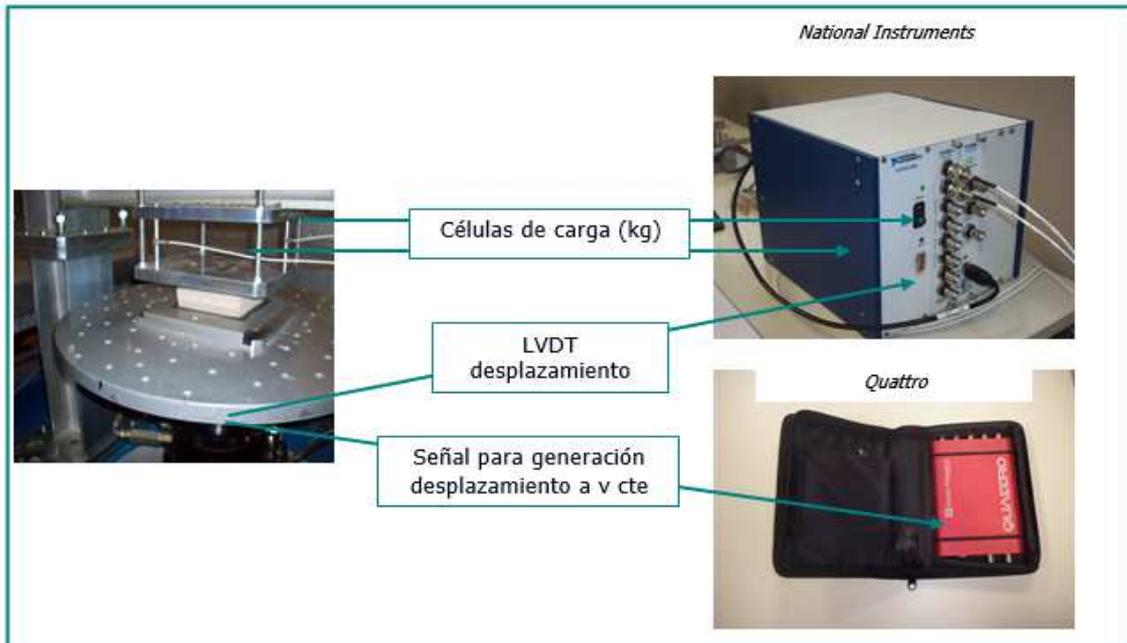


Fig. 11. Detalle máquina de compresión rápida.

**4.2. EXPERIMENTO 2.** Selección del material de amortiguamiento óptimo: Desarrollo de un método para la selección del material de amortiguamiento óptimo para la protección de un producto, teniendo en cuenta su capacidad para proteger al producto (curvas de amortiguamiento), comportamiento medioambiental y costes asociados a lo largo de todo su ciclo de vida.

El método se basará en un análisis comparativo de la variable económica y medioambiental de cada una de las alternativas de diseño. Nota: el diseño de los bloques de protección depende de las características técnicas del material de amortiguamiento considerado.

Con el fin de desarrollar la metodología de selección del material de amortiguamiento óptimo atendiendo a criterios económicos y medioambientales, ha sido necesario combinar diferentes tecnologías y/o metodologías ya existentes:

1. Determinación de las propiedades físico – mecánicas: cantidad de amortiguamiento requerido. Diseño optimizado del bloqueo de protección: Criterio Funcional.  
Se ha de diseñar el bloqueo de protección óptimo para cada uno de los materiales de protección considerados, en función de sus curvas de amortiguamiento, siguiendo el método de los seis pasos, el cual se describe a continuación.

Posteriormente, a partir de los diseños optimizados, se determinarán los dos criterios que se tendrán en cuenta para aplicar el análisis comparativo, con el fin de realizar la selección del bloqueo de protección óptimo entre las posibles alternativas contempladas:

2. Estudio del comportamiento medioambiental del bloqueo de material de amortiguamiento en cada una de sus etapas de ciclo de vida. Análisis de ciclo de vida: criterio medioambiental ( $C_1$ ).
3. Desarrollo de un modelo de costes para el bloqueo de material de amortiguamiento: Criterio económico ( $C_2$ )
4. Análisis comparativo de las alternativas de bloqueo de material de amortiguamiento en base a los resultados de los dos criterios de selección estudiados.

A continuación se describen en detalle los métodos e instrumentación en cada una de las investigaciones que conforman este segundo Experimento:

#### **4.2.1. Determinación de las curvas de amortiguamiento del material. Método ASTM D1596. Diseño del bloqueo mínimo necesario para cada material capaz de superar los riesgos del ciclo de distribución.**

La obtención de las curvas de amortiguamiento, se realizó mediante el método recogido en la norma ASTM D1596. La máquina de cushion que se utilizó para realizar los ensayos, se fundamenta en las pautas recopiladas en la norma ASTM D1596, pero se ha mejorado con el fin de mejorar la fiabilidad de los resultados y reducir los tiempos necesarios para la obtención de las curvas de amortiguamiento del material objeto de análisis, debido al aumento de su grado de automatización. Para el desarrollo de las mejoras se utilizó la programación del hardware de adquisición de datos del equipo mediante Labview®. Posteriormente se realizaron las pruebas de depuración y detección de errores.

En las siguientes imágenes se puede apreciar el equipo para la caracterización de materiales de amortiguamiento diseñada para realizar los ensayos según la norma ASTM D1596:

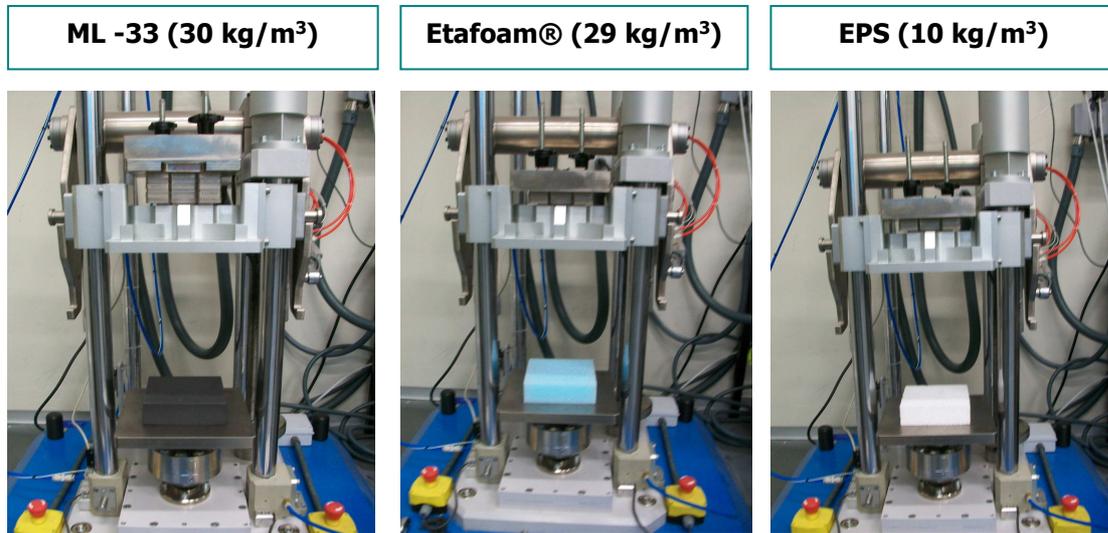


Figure 12. Materiales de amortiguamiento seleccionados para la investigación: ML-33 (30 kg/m<sup>3</sup>), Etafoam® (29 kg/m<sup>3</sup>), EPS (10 kg/cm<sup>3</sup>).

La máquina de cushion desarrollada por ITENE para la obtención de las curvas de amortiguamiento siguiendo las pautas recogidas en la norma ASTM D1596, presenta ventajas frente a las existentes en el mercado, tal y como se indica a continuación:



- La altura de caída se coloca de forma automática, por lo cual aumenta la precisión de los resultados, además de reducirse el tiempo por ensayo.
- Se obtiene además de la curva típica de la aceleración, la curva fuerza versus deformación del shock.
- Se evitan los rebotes, muy habituales en los ensayos con pequeña altura, por lo que se disminuye el error asociado a este efecto, se reducen las muestras necesarias y en definitiva el tiempo asociado a los ensayos.
- Aumenta el rango de pesas ligeras y pesadas para poder diseñar los experimentos y obtener mayor cantidad de puntos en las curvas de amortiguamiento a desarrollar para un material.

Figure 13. Máquina de cushion desarrollada por ITENE.

Las muestras eran de 15 × 15 cm y 50 mm de espesor y con las siguientes densidades;

- **EPS (10 kg/m<sup>3</sup>).**
- **Etafoam® (29 kg/m<sup>3</sup>). Espuma de polietileno de célula cerrada y no reticulado.**
- **ML-33 (30 Kg/m<sup>3</sup>). Espuma de polietileno de célula cerrada y reticulada.**

Las densidades utilizadas se seleccionaron, por ser de las más habituales en este tipo de bloqueos. Para ello se entrevistaron a varios proveedores: fabricantes y transformadores de estos materiales de amortiguamiento.

Las alturas seleccionadas:

- 30 cm
- 60 cm
- 90 cm
- 120 cm

Las cargas estáticas:

- ✓ 1.42 KPa
- ✓ 2.27 KPa
- ✓ 3.74 KPa
- ✓ 5.25 KPa
- ✓ 6.14 KPa
- ✓ 7.08 Kpa
- ✓ 10.52 Kpa
- ✓ 14.01 KPa

Las alturas de caída así como las cargas estáticas se seleccionaron tras realizar una serie de ensayos preliminares que asegurasen que los puntos que se obtenían permitían trazar las curvas de amortiguamiento de los materiales objeto de estudio.

En la siguiente tabla a modo de resumen se presenta el experimento que se ha llevado a cabo para cada uno de los materiales de amortiguamiento:

*Tabla 2. Resumen del experimento para la obtención de las curvas de amortiguamiento en el experimento 2.*

espesor (cm) espuma	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	carga estática (KPa)
5	30	60	90	120	1.42
5	30	60	90	120	2.27
5	30	60	90	120	3.74
5	30	60	90	120	5.25
5	30	60	90	120	6.14
5	30	60	90	120	7.08
5	30	60	90	120	10.52
5	30	60	90	120	14.01

#### **4.2.2. Análisis del comportamiento medioambiental del bloqueo de material de amortiguamiento en cada una de sus etapas del ciclo de vida. Análisis de Ciclo de vida (ACV). Criterios medioambientales (C1).**

La metodología de análisis de ciclo de vida es la propuesta en las normas UNE-EN ISO 14044:2006, y UNE-EN ISO 14046:2006 y se utiliza el programa SimaPro 7.0.2. de PRÉ Consultants, para realizar los cálculos así como las bases de datos sobre el impacto asociado al procesamiento de materias primas, fabricación del bloqueo, transporte y tratamiento de residuos.

La evaluación del impacto del ciclo de vida del producto se ha realizado mediante el método Ecoindicador 99, desarrollado por PRÉ Consultants B.V (2000). Este método de evaluación tiene tres versiones: la igualitaria E, individualista (I) y la jerarquista (H). En este estudio se ha considerado el Ecoindicador 99 – I/I que utiliza 10 categorías de impacto ambiental:

1. Carcinogénico
2. Respiratorio por sustancias orgánicas
3. Respiratorio por sustancias inorgánicas
4. Cambio climático
5. Radiación y
6. Destrucción de la capa de ozono
7. Toxicidad
8. Acidificación / Eutrofización
9. Uso del suelo
10. Disminución de los recursos minerales

#### **4.2.3. Desarrollo de un modelo económico. Criterios económicos (C2).**

El modelo económico a desarrollar está referido al producto a proteger y contempla las principales fases de su ciclo de vida, tal y como se aprecia a continuación:

El modelo económico contempla las siguientes variables:

- ✓  $X_1$ : El coste de las materias primas del material de amortiguamiento.
- ✓  $X_2$ : Transporte 0 (100 km) de las láminas de espuma desde el fabricante al procesador.
- ✓  $X_3$ : Costes derivados de la transformación del material.
- ✓  $X_4$ : Costes asociados al transporte de las protecciones desde el fabricante de embalaje hasta el fabricante de televisores.
- ✓  $X_5$ : Costes asociados al espacio ocupado en el almacén del fabricante de producto.
- ✓  $X_6$ : Costes asociados al transporte del televisor una vez embalado.

A continuación se desarrolla la fórmula de cada una de las variables consideradas en el modelo económico:

**X<sub>1</sub>. El coste de las materias primas del material de amortiguamiento;**

$$X_1 = \text{peso de las protecciones diseñadas (kg)} \times \text{material (€)} \quad [3]$$

**X<sub>2</sub>. Transporte 0 (100 km) de las láminas de espuma desde el fabricante al procesador;**

$$X_2 = \frac{\text{dist (km)} \times \text{gasoil (€/l)} \times \text{gasoil consumo (l/km)}}{n^\circ \text{TV embaladas / camión}} \quad [4]$$

**X<sub>3</sub>. Costes derivados de la transformación del material, en función del diseño y del material pueden darse diferentes procesos: moldes, troqueles, fresadoras, corte por hilo caliente etc;**

$$X_3 = \text{inversión inicial (€)} + \text{energía (€)} / \text{TV set} \quad [5]$$

*Estos costes son fundamentalmente debidos al consumo energético o bien en el caso de determinados diseños y materiales como el EPS al coste del molde ó de los troqueles, desarrollados de forma particular en función del diseño de la protección.*

**X<sub>4</sub> Costes asociados al transporte de las protecciones desde el fabricante de embalaje hasta el fabricante de televisores;**

$$X_4 = \frac{\text{dist (km)} \times \text{gasoil (€/l)} \times \text{gasoil consumo (l/km)}}{n^\circ \text{TV embaladas / camión}} \quad [6]$$

**X<sub>5</sub>. Costes asociados al espacio ocupado en el almacén del fabricante de producto;**

$$X_5 = \frac{\text{alquiler mensual}(\text{€})}{n^{\circ}TV \text{ embaladas con } 2 \text{ pallets de protecciones}} \quad [7]$$

**X<sub>6</sub>. Costes asociados al transporte del televisor una vez embalado;**

$$X_6 = \frac{\text{dist (km)} \times \text{gasoil (€/l)} \times \text{gasoil consumo (l/km)}}{n^{\circ}TV \text{ embaladas / camión}} \quad [8]$$

**Por lo que la ecuación que define al modelo económico será el sumatorio de cada una de las variables indicadas anteriormente:**

✓ **Ecuación del modelo de costes (€) =  $X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6$**  [9]

*Finalmente los datos obtenidos a partir de cada una de las investigaciones realizadas para cada uno de los dos criterios C1 y C2, se engloban dentro de la metodología de optimización basada en un análisis comparativo.*

**4.2.4. Metodología basada en el análisis comparativo.**

La finalidad de esta investigación, especialmente en este segundo Experimento es desarrollar una metodología de selección que permita reducir los costes asociados a un sistema de protección, al mismo tiempo que se reducen las cargas ambientales asociadas. La metodología resultante permitirá a los diseñadores de embalaje la selección de una protección optimizada desde el punto de vista económico y medioambiental. El diseño funcional de las alternativas de protección se realiza mediante el método de los seis pasos donde se utiliza el standard de caracterización de materiales recopilado en la ASTM D 1596. En el caso del análisis del criterio medioambiental se utiliza el análisis de ciclo de vida y para el criterio económico se desarrollará un modelo a medida para esta metodología, la cual se esquematiza a continuación:

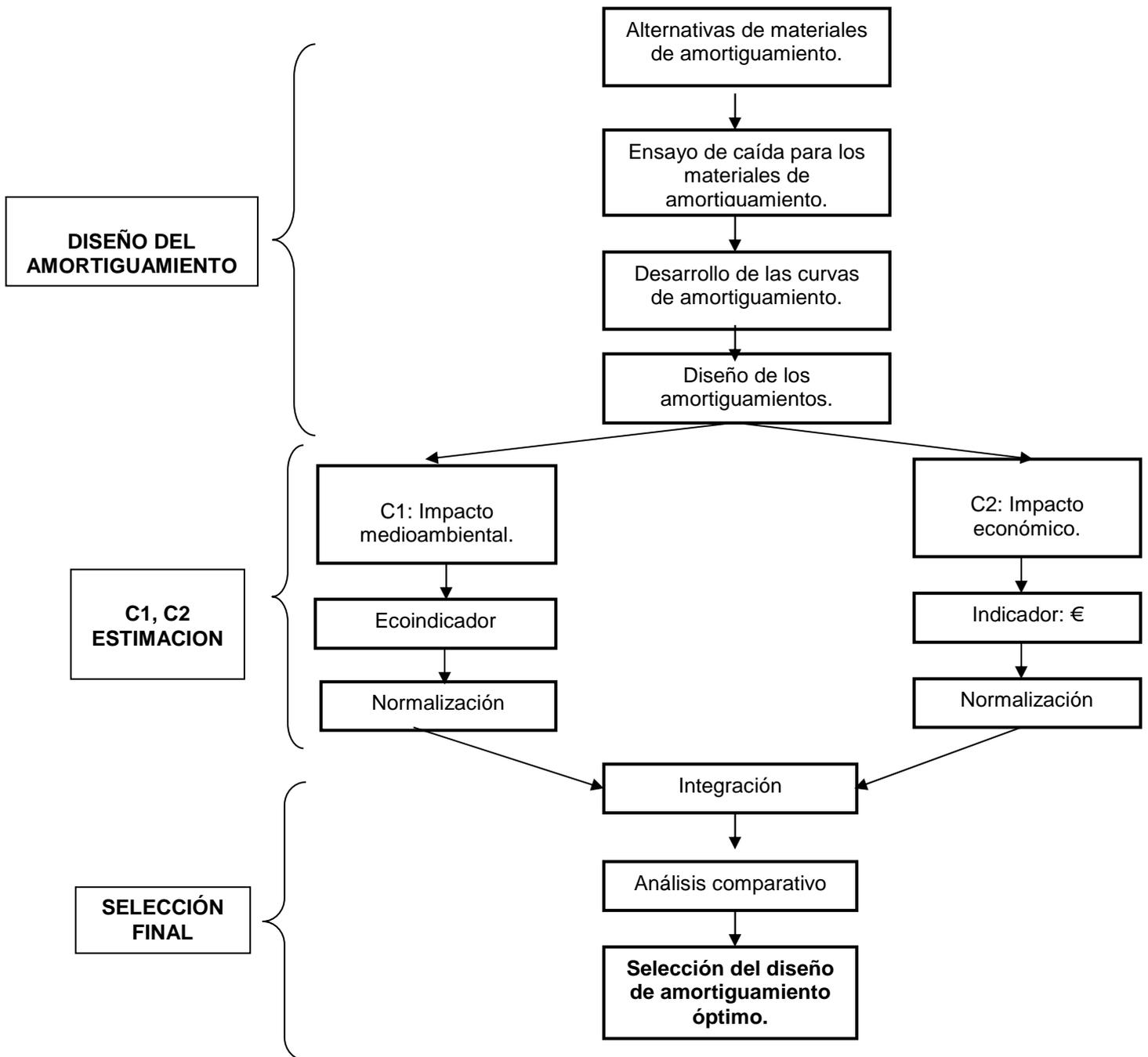


Fig 14. Diferentes análisis y técnicas utilizadas para el desarrollo de la metodología de selección.

En el siguiente esquema se muestra la metodología para la selección de un bloqueo de material de amortiguamiento óptimo, en función de criterios económicos y medioambientales, basada en un análisis comparativo de diferentes alternativas  $A_1 \dots A_n$ .

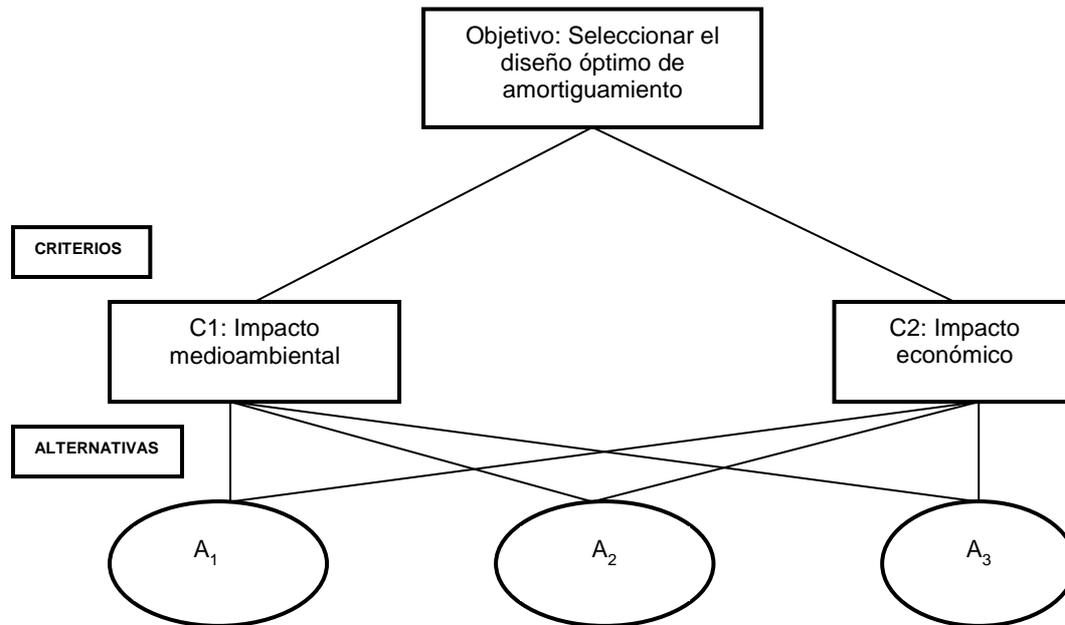


Fig 15. Esquema de la metodología de selección.

Dado que se trata de un problema multicriterio donde aparecen varias alternativas (diseños de bloqueos de amortiguamiento) y dos criterios el económico y el medioambiental, se podría aplicar cualquiera de las técnicas de decisión multicriterio discretas o finitas, descritas en el apartado 2.4. de esta tesis.

En la siguiente tabla se describen cada uno de los criterios considerados:

Table 3. Descripción de los criterios considerados.

CRITERIO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
<b>C1: Impacto medioambiental</b>	El mínimo impacto medioambiental producido por cada uno de las etapas del ciclo de vida del bloqueo de protección.	Contribución (%) de cada una de las categorías de impacto consideradas (Ecoindicator 99 I/I) para las diferentes etapas del ciclo de vida del bloqueo de protección.
<b>C2: Impacto económico.</b>	El mínimo coste asociado a las etapas del ciclo de vida del bloqueo de protección.	€

Destacar que dentro de cada uno de los criterios principales  $C_1$  y  $C_2$ , existen subcriterios. En el caso del  $C_1$  (criterio medioambiental), cada una de las categorías de impacto contempladas en el programa Simapro /0, en la versión Ecoindicator - I/I, donde los pesos de cada una de las categorías (subcriterios), están dados por el mismo sistema. En el caso de  $C_2$  (económico) existen subcriterios como los costes de las materias primas, producción/fabricación, transportes, almacenamiento etc, donde los pesos de cada uno de los subcriterios se han considerado equivalentes.

## 5. RESULTADOS.

Una vez descritos los materiales y métodos de cada uno de los dos experimentos que componen esta tesis, se describen en detalle los resultados alcanzados en cada uno de ellos.

**5.1. EXPERIMENTO 1.** Estudio comparativo de la fiabilidad de las curvas de amortiguamiento resultantes de los métodos simplificados: método de Michael Sek y del método de Gary Burgess, frente a las obtenidas siguiendo el método tradicional recopilado en la norma ASTM D1596, aceptado industrialmente, aplicado a espumas de célula cerrada. Se utilizará como materiales el EPS (15 kg/m<sup>3</sup>) y Etafoam® (29 kg/m<sup>3</sup>).

El objetivo de este experimento era realizar un análisis comparativo (determinar la desviación mediante el cálculo de los errores) entre las curvas de amortiguamiento obtenidas por los dos métodos abreviados (M. Sek, Burgess), y las obtenidas aplicando el método tradicional de ensayo recopilado en la norma ASTM D 1596, para los materiales de célula cerrada estudiados en este experimento. (EPS, Etafoam®).

La finalidad última, es demostrar que mediante estos métodos abreviados se pueden determinar las curvas de amortiguamiento de una manera menos costosa en tiempo y número de muestras en comparación con el método tradicional. De esta manera se pretende divulgar el uso de estos métodos para que se diseñen los materiales de amortiguamiento de forma optimizada aplicando el método de los seis pasos. Donde la obtención de las curvas de amortiguamiento es un paso clave.

A continuación se muestran las gráficas seleccionadas para poder analizar los resultados obtenidos tras la aplicación de los tres métodos, a las muestras de los dos materiales de amortiguamiento ensayados:

- ✓ Graficas comparativas del método de M. Sek y de la norma ASTM D 1596 para el Etafoam ® y el EPS.
- ✓ Graficas comparativas del método de Burgess y de la norma ASTM D 1596 para el Etafoam ® y el EPS.
- ✓ Grafica comparativa de los dos materiales al representarse la ecuación del método de Burgess (Tensión dinámica vs energía dinámica).
- ✓ Cálculo de errores del método de Burgess para el Etafoam y para el EPS:
  - Graficas de distribución del error del método de Burgess vs los resultados obtenidos con la ASTM D 1596, en función del número de puntos seleccionados para el ajuste de la ecuación del método Burgess.
  - Gráfica distribución del error del método de Burgess vs de los resultados obtenidos con la norma ASTM D 1596, en función de la distancia que existe entre los puntos de carga dinámica seleccionados para realizar el ajuste.
- ✓ Graficas de errores medios y máximos de los dos métodos frente al de la norma ASTM D 1596, para el EPS y Etafoam®, teniendo en cuenta la altura de caída y las cargas estáticas.

- **Método de Michael SEK**

En la siguiente gráfica se puede observar como evoluciona la deformación de las espumas de EPS y de PE – Etafoam®, en función de la tensión a la que se le somete para una velocidad de compresión de 0.425 m/s.

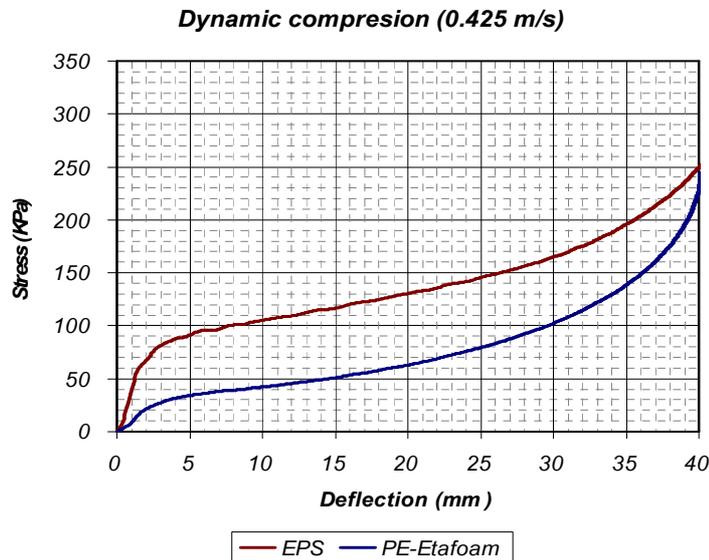


Fig. 16. Comparación de los resultados del PE y EPS en la representación gráfica de la carga frente a la deformación. Navarro P., 2011.

De la gráfica se desprende que en el caso de la espuma de polietileno la deformación es mayor a igual tensión, frente al poliestireno expandido y a una velocidad de compresión de 0.425 m/s.

En las siguientes gráficas se representan las curvas de amortiguamiento obtenidas mediante el método recogido en la norma ASTM D1596, frente a las obtenidas tras la aplicación del método de Michael Sek (sin la determinación del factor de velocidad que corrija los efectos dinámicos del ensayo de compresión a partir del cual se determina la aceleración del impacto: Sek non-ILMS) para la espuma de PE – Etafoam® y el EPS:

**PE - Etafoam®**

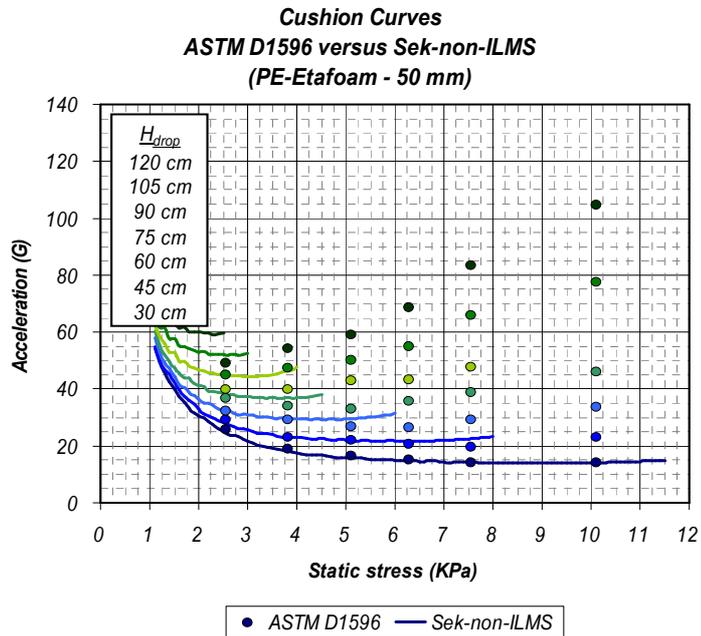


Fig 17. Comparación de las curvas de amortiguamiento obtenidas para la espuma de PE, mediante el método ASTM 1596 y mediante el método de Sek, sin el cálculo del factor de velocidad. Navarro P., 2011.

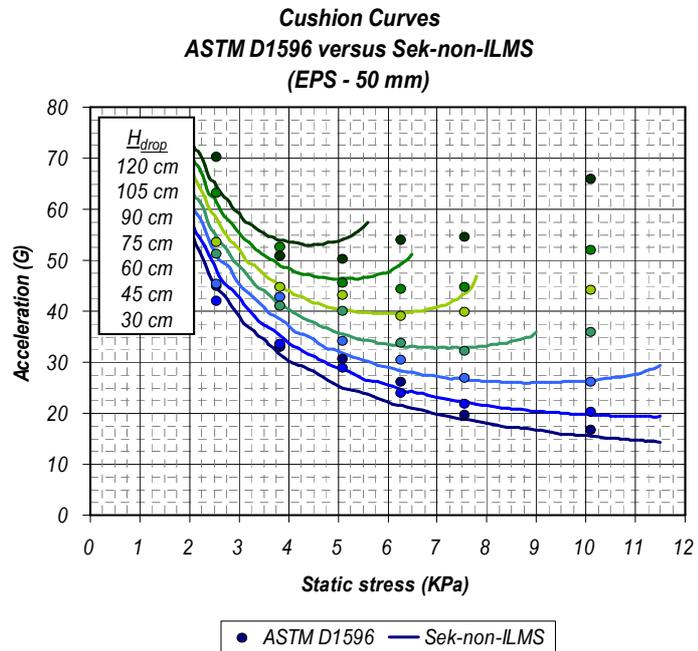


Fig 18. Comparación de las curvas de amortiguamiento obtenidas para el EPS, mediante el método ASTM 1596 y mediante el método de Sek, sin el cálculo del factor de velocidad. Navarro P., 2011.

De las gráficas anteriores se puede observar de una forma cualitativa como para una altura de caída de hasta 76.2 cm, las curvas obtenidas por método de Michael Sek son muy próximas a las obtenidas por el método de ASTM 1596, por lo que se trata de un método óptimo por lo menos hasta esta altura de caída, para los dos materiales de amortiguamiento considerados.

En este método dado que la velocidad utilizada en el ensayo de compresión es de 0.425 m/s, se ha considerado el factor de velocidad cercano a 1 y por lo tanto no ha sido necesario calcularlo mediante un algoritmo de mínimos cuadrados tal y como indica el autor del método en su publicación.

No obstante las curvas obtenidas por método de Michael Sek, están incompletas en la parte derecha superior, como consecuencia de que durante el ensayo de compresión a alta velocidad, la muestra de 5 cm de espesor no se comprimió totalmente. Para mejorar los resultados obtenidos para alturas superiores a 76,2 cm, sería necesario aumentar la velocidad de compresión del ensayo realizado ó calcular el factor dinámico de velocidad.

- **Método Burgess**

En la siguiente gráfica se representan las curvas de amortiguamiento obtenidas mediante el método ASTM D1596 y las curvas de amortiguamiento obtenidas tras la aplicación del método de Burgess, para dos de los materiales de amortiguamiento objeto de estudio: PE – Etafoam® y el EPS:

**PE - Etafoam®.**

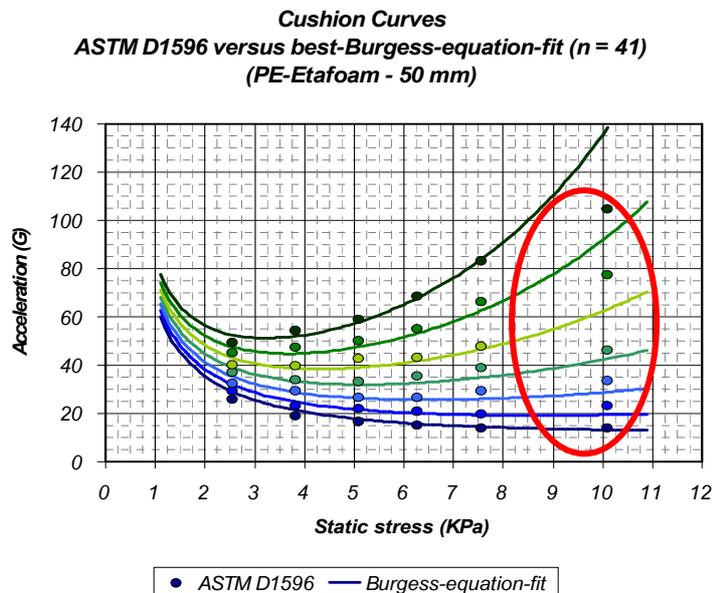


Fig 19. Comparación de las curvas de amortiguamiento obtenidas para la espuma de PE, mediante el método ASTM 1596 y mediante el método de Burgess. Navarro P., 2011.

## EPS

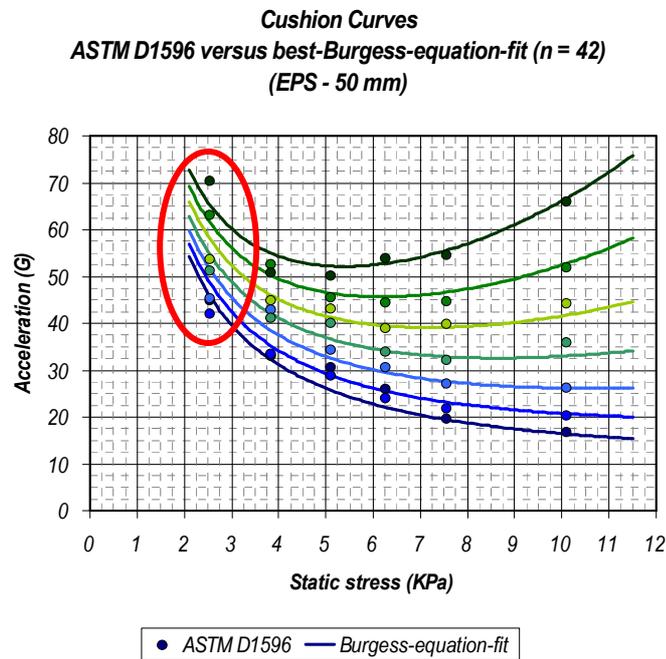


Fig 20. Comparación de las curvas de amortiguamiento obtenidas para la espuma de EPS, mediante el método ASTM 1596 y mediante el método de Burgess. Navarro P., 2011.

En las gráficas anteriores se puede observar de forma cualitativa, como las curvas de amortiguamiento para el EPS, obtenidas por el método ASTM D1596 y mediante el método de Burgess, son muy similares, salvo para valores bajos de carga estática, por lo que en general, resulta un método óptimo para estos tipos de materiales.

No obstante en el caso de la espuma PE – Etafoam®, el método de Burgess, no se ajusta para valores de carga estática elevados. Este efecto se acentúa para alturas de caída mayores. Señalar que en el caso de haber seleccionado el número tradicional de puntos para realizar el ajuste, siguiendo el método de Burgess, (8 puntos), en vez de la totalidad de puntos disponibles (obtenidos mediante el ensayo de los dos materiales siguiendo la norma ASTM D1596), la diferencia entre este método y el estándar, tradicional, hubiera sido mayor.

Si se representan las ecuaciones típicas del método de Burgess, en el caso del EPS, se puede observar como se ajusta a la ecuación exponencial del método, no obstante en el caso de la espuma de PE – Etafoam®, existe una desviación importante:

$$[2] \begin{cases} \text{Dynamic\_stress} = a \cdot e^{b \cdot \text{energy\_density}} \\ \text{Energy\_density} = \frac{\text{Static\_Stress} \cdot \text{Drop\_height}}{\text{Cushion\_thickness}} \\ \text{Dynamic\_stress} = \text{Peak\_acceleration} \cdot \text{Static\_stress} \end{cases}$$

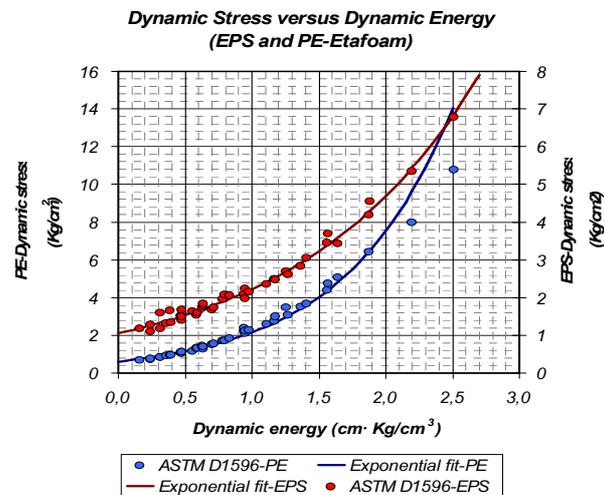


Fig 21. Comparación de las curvas obtenidas para la espuma de PE y el EPS, al representar el Tensión dinámica vs Energía dinámica. Navarro P., 2011.

### CALCULO DE ERRORES:

A continuación se describen los diferentes cálculos de errores realizados para poder cuantificar la desviación de los resultados de los métodos abreviados (M. Sek, G. Burgess) frente al método estándar (ASTM D 1596):

#### 1. Cálculo de los errores: Error medio y máximo del método de Burgess, en función del número de puntos seleccionados para el ajuste de la curva.

Se calcularon todas las posibles combinaciones para realizar el ajuste, teniendo en cuenta los 41 puntos disponibles en el caso del PE – Etafoam®, tomados de dos en dos, de cuatro en cuatro, de ocho en ocho y finalmente se consideraron el total de los 41 puntos disponibles. Para cada combinación, se calcularon las 41 g por el método de Burgess, así como el error frente a los 41 g obtenidos según la ASTM D1596.

En la siguiente gráfica se muestra la distribución del error obtenida mediante el método de Burgess, en función del número de puntos utilizados para el ajuste de la ecuación para los dos materiales de amortiguamiento objeto de estudio:

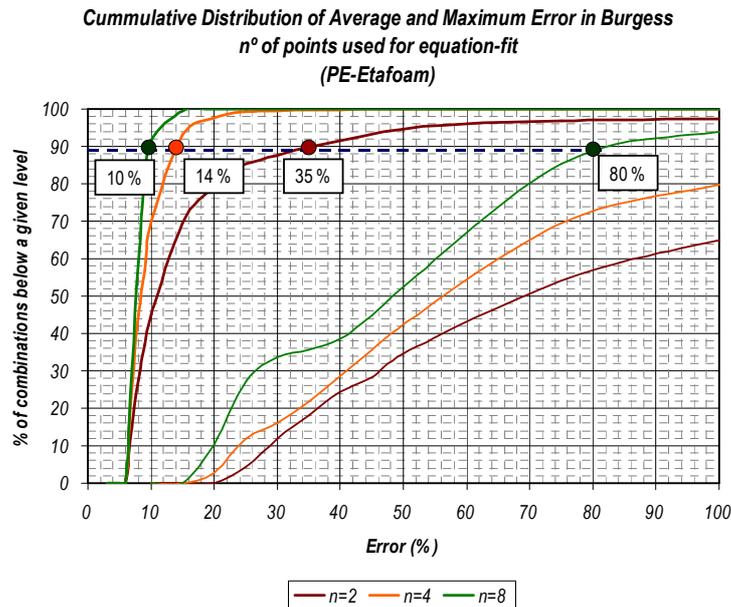


Fig 22. Distribución del error (%) del método de Burgess en función del número de puntos seleccionados para el ajuste de la ecuación, en el caso del PE. Navarro P., 2011.

De la gráfica anterior se desprende que el porcentaje de error con el método de Burgess aumenta a medida que disminuye el número de puntos seleccionados para realizar el ajuste de la ecuación, para el caso de la espuma de PE – Etafoam®.

Se calcularon el error máximo y el error medio así como la distribución acumulativa de los errores. Se detectó que para un ajuste con 8 puntos, en el 90 % de las combinaciones el error medio y el máximo, estaban por debajo de un 10 y un 80 % respectivamente.

### EPS:

Se calcularon todas las posibles combinaciones para realizar el ajuste, teniendo en cuenta los 42 puntos disponibles en el caso del EPS, tomados de dos en dos, de cuatro en cuatro de ocho en ocho y finalmente se consideraron el total de los 42 puntos disponible. Para cada combinación, se calcularon las 42 g por el método de Burgess, así como el error frente a los 42 g obtenidos según la ASTM D1596.

En la siguiente gráfica se muestra la distribución del error obtenida mediante el método de Burgess, **en función del número de puntos** utilizados para el ajuste de la ecuación para los dos materiales de amortiguamiento objeto de estudio:

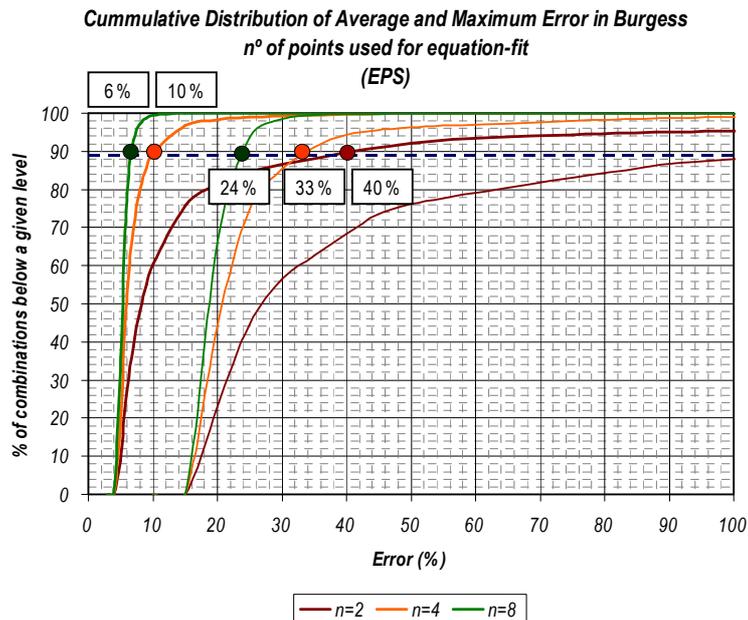


Fig 23. Distribución del error (%) del método de Burgess en función del número de puntos seleccionados para el ajuste de la ecuación, en el caso del EPS. Navarro P., 2011.

Se calcularon el error máximo y el error medio así como la distribución acumulativa de los errores. Se detectó que para un ajuste con 8 puntos, en el 90 % de las combinaciones el error medio y el máximo, estaban por debajo de un 6 y un 24 % respectivamente. Para un ajuste con 2 puntos, el 90 % de las combinaciones presentaban un error por debajo del 40 %.

Al igual que en el caso de la espuma de PE – Etafoam®, el porcentaje de error aumenta a medida que disminuye el número de puntos utilizados para realizar el ajuste de la ecuación.

## 2. Cálculo de los errores: Error medio y máximo del método de Burgess, en función del número de puntos seleccionados para el ajuste y del coeficiente de tensión dinámica asociado, para el ajuste de la curva.

Se observó la influencia que tiene la distancia entre los puntos seleccionados para realizar el ajuste sobre los errores calculados para este método.

Por esta razón se consideró relevante, realizar un análisis de los errores con el mismo número de combinaciones, en el que se define un coeficiente del rango de la tensión dinámica, como un cociente entre la tensión dinámica máxima y mínima existente entre los puntos seleccionados en cada uno de los ajustes.

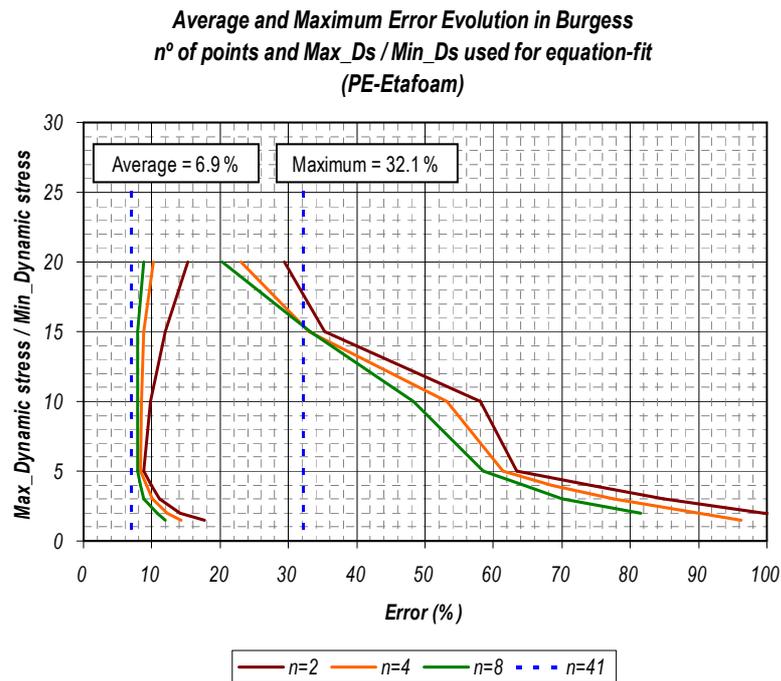


Fig 24. Distribución del error (%) del método de Burgess en función de la distancia que existe entre los puntos de carga dinámica seleccionados para realizar el ajuste, en el caso de la espuma de PE. Navarro P., 2011.

En este caso, teniendo en cuenta los 41 puntos disponibles para la espuma PE – Etafoam®, el error máximo y el error medio fueron comparando el método de Burgess con el standard (ASTM D1596) 32,1 y 6,9 % respectivamente.

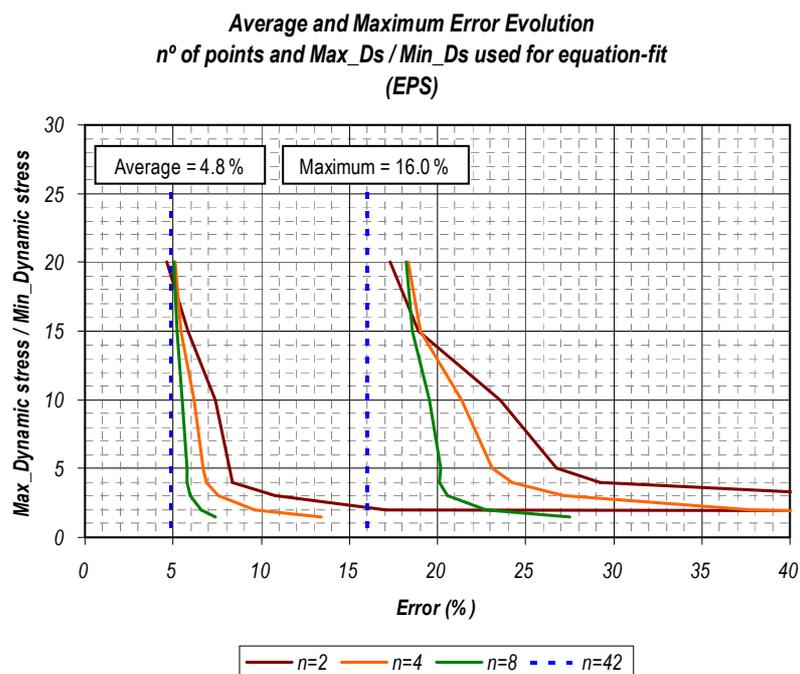


Fig 25. Distribución del error (%) del método de Burgess en función de la distancia que existe entre los puntos de carga dinámica seleccionados para realizar el ajuste, en el caso de la espuma de EPS. Navarro P., 2011.

En el caso del EPS, se consideraron los 42 puntos, y el máximo error y el error medio entre los resultados del método de Burgess y el estándar, son 16 % y 4,8 % respectivamente.

En ambas gráficas tanto para el caso de la espuma de PE – Etafoam® como en el caso de la espuma de EPS, se puede considerar que el porcentaje de error es mayor en el caso de que los puntos de tensión dinámica seleccionados estén más próximos entre sí, resultando en un ajuste de la ecuación exponencial peor frente a la posibilidad de seleccionar puntos de tensión dinámica con valores más distantes entre sí.

### 3. Cálculo de los errores medios y máximos de los dos métodos simplificados frente al de la norma ASTM D1596, para los dos materiales considerados; PE – Etafoam® y EPS.

Con el fin de determinar la influencia de la altura de caída en los resultados obtenidos para ambos métodos simplificados y por lo tanto en sus errores asociados frente al método descrito en el método estándar, se realiza el análisis de los errores obtenidos por material frente a las alturas de caída y frente a las cargas estáticas utilizadas en el diseño del experimento:

#### EPS; Errores medios y máximos frente altura de caída

En las siguiente tabla se observa como el error medio y el máximo correspondiente al método de Sek, es similar al del método de Burgess, hasta alturas de 76,2 cm (influencia de la velocidad, a mayor altura, es necesaria una mayor velocidad). Destacar que para alturas de hasta 76,2 cm el método de Sek, presenta un error medio y un error máximo de **6,09 % y 14,11 %** respectivamente frente a un **5,66 % y 13,26 %** obtenidos para el método de Burgess. Por lo que en ambos métodos para alturas de hasta 76,2 cm, los errores medios y máximos son muy similares.

Tabla 4. Resumen del error máximo y medio para ambos métodos simplificados frente al estándar para el EPS.

H caída (cm)	Método de M, Sek		Método de Burgess n = 42 puntos	
	Error medio (%)	Error máximo (%)	Error medio (%)	Error máximo (%)
30,48	8,39	18,36	6,18	16,00
45,72	4,82	14,37	6,07	15,49
60,96	6,60	12,52	5,62	13,34
76,20	4,54	11,21	4,75	8,21
91,44	5,34	9,51	3,93	7,95
106,68	5,69	11,04	3,06	4,57
121,92	11,57	20,51	4,21	8,42
Media (%)	6,71	13,93	4,83	10,57
<b>Media hasta 76,2 cm (%)</b>	<b>6,09</b>	<b>14,11</b>	<b>5,66</b>	<b>13,26</b>

Representando el error medio y máximo de ambos métodos frente a la altura, y considerando únicamente las alturas de hasta 76,2 cm, se puede observar que el error de Burgess es similar al obtenido mediante el método de Sek, para la mayoría de los puntos:

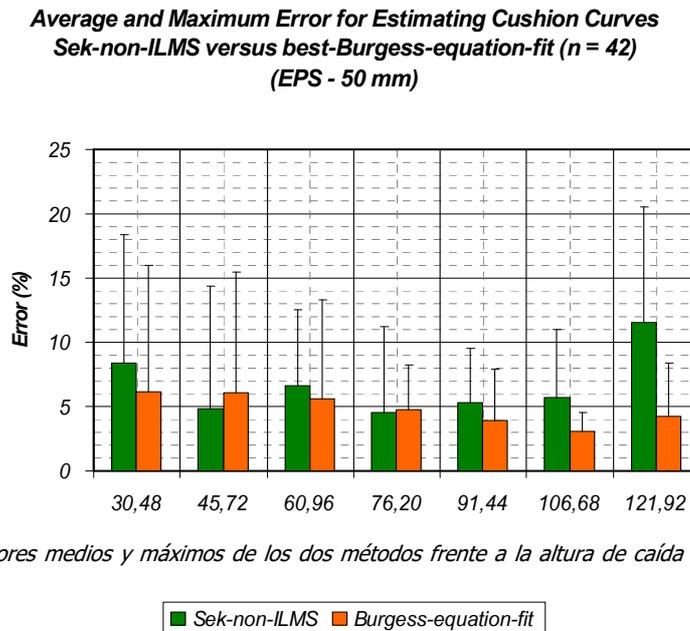


Fig 26. Errores medios y máximos de los dos métodos frente a la altura de caída EPS. Navarro P.

### EPS; Errores medios y máximos frente a la carga estática

Teniendo en cuenta las cargas estáticas para alturas de hasta 76,2 cm, el error máximo y el medio para el método de Sek es de 18,4 % y 9,3 %, si consideramos todos los valores de carga estática el error máximo y el medio disminuyen; 11,8 % y 6,1 % respectivamente, En el caso del método de Burgess, teniendo en cuenta todas las cargas estáticas sin limitación de la altura de caída, el error máximo y el error medio son 11,8 % y 5,7 % respectivamente, los cuales son prácticamente iguales a los obtenidos en el caso del método de Sek.

Tabla 5. Resumen del error máximo y medio para las seis cargas estáticas consideradas hasta alturas de caída de 76,2 cm, para el EPS,

Carga estática (KPa)	Método de M. Sek		Método de Burgess n = 42 puntos	
	Error medio (%)	Error máximo (%)	Error medio (%)	Error máximo (%)
2,55	8,54	14,37	9,25	15,49
3,83	4,99	10,07	4,90	9,82
5,10	<b>9,31</b>	<b>18,36</b>	7,31	16,00
6,28	7,26	17,23	6,48	15,20
7,55	2,43	3,92	3,04	6,49
10,10	3,83	6,58	2,95	7,89
<b>Media (%)</b>	<b>6,06</b>	<b>11,76</b>	<b>5,66</b>	<b>11,82</b>

En la siguiente gráfica se representan los errores máximo y medios para ambos métodos frente a la carga estática:

Average and Maximum Error for Estimating Cushion Curves  
Sek-non-ILMS versus best-Burgess-equation-fit (n = 42)  
(EPS - 50 mm / Max Drop High - 76,2 cm)

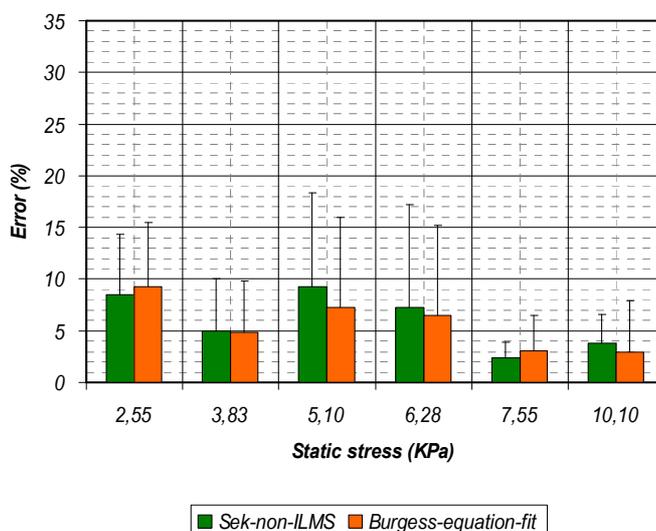


Fig 27. Errores medios y máximos de los dos métodos frente a la tensión estática. EPS. Navarro P., 2011.

### PE – Etafoam®; Errores medios y máximos frente a la altura de caída,

En la siguiente tabla se adjuntan los errores medios y máximos calculados para los dos métodos simplificados frente al recogido en la norma ASTM D1596, En el caso del método de Sek, el error medio y el máximo calculados hasta alturas de 76,2 cm son 9,67% y 4,60% respectivamente,

En el método de Burgess el error medio y el máximo teniendo las alturas de caída hasta 76,2 cm son 6,83% y 13,40 %, De esta representación gráfica se desprende que el error del método de Burgess frente al estándar para el material PE – Etafoam®, es mayor, siendo más fiable el método de Sek en este tipo de espumas de polietileno de célula cerrada no reticulada,

Tabla 6, Resumen del error medio y máximo calculado para las siete alturas de caída y PE-Etafoam®,

H caída (cm)	Método de M, Sek		Método de Burgess n = 42 puntos	
	Error medio (%)	Error máximo (%)	H caída (cm)	Error medio (%)
30,48	2,74	4,51	8,00	13,24
45,72	5,13	15,54	6,26	15,85
60,96	4,52	10,19	7,01	14,19
76,20	6,01	8,46	6,08	10,32
91,44	14,58	16,85	4,98	8,91
106,68	15,68	15,68	7,61	7,61
121,92	21,67	21,67	7,72	7,72
Media (%)	10,05	13,27	6,81	11,12
<b>Media hasta 76,2 cm (%)</b>	<b>4,60</b>	<b>9,67</b>	<b>6,83</b>	<b>13,40</b>

A continuación, se muestra la representación gráfica de los errores medio y máximo frente a las alturas de caída para el material PE – Etafoam®:

*Average and Maximum Error for Estimating Cushion Curves  
Sek-non-ILMS versus best-Burgess-equation-fit (n = 41)  
(PE-Etafoam - 50 mm)*

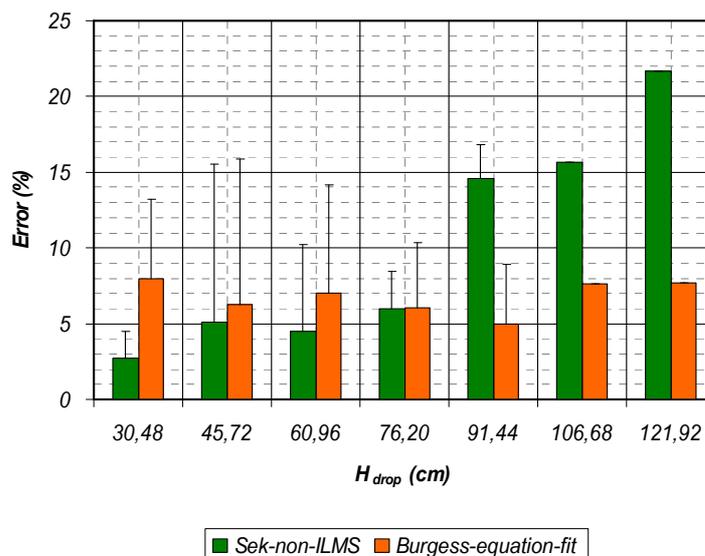


Fig 28. Errores medios y máximos de los dos métodos frente a la altura de caída. PE. Navarro P., 2011.

### PE – Etafoam®; Errores medios y máximos frente a la carga estática

Tal y como se desprende de la tabla resumen que se adjunta a continuación, el error máximo y medio del método de Sek - non – ILMS, teniendo en cuenta las 5 cargas estáticas de la tabla, son 8,9 % y 4,8 % respectivamente, En el caso del método de Burgess, el error máximo y medio son 10,5 % y 6,0 % respectivamente, Con lo cual los errores calculados para los dos métodos simplificados en comparación con el método estándar, para el material PE – Etafoam®, no son numéricamente significativos,

Tabla 7, Resumen del error máximo y medio para las seis cargas estáticas consideradas hasta alturas de caída de 76,2 cm, para el PE – Etafoam®,

Carga estática (KPa)	Método de M, Sek		Método de Burgess n = 42 puntos	
	Error medio (%)	Error máximo (%)	Error medio (%)	Error máximo (%)
2,55	3,62	4,51	9,64	12,85
3,83	3,28	8,46	5,92	13,24
5,10	4,47	10,19	3,23	7,15
6,28	3,53	5,65	4,76	8,07
7,55	9,30	15,54	6,55	11,36
<b>Media (%)</b>	<b>4,84</b>	<b>8,87</b>	<b>6,02</b>	<b>10,53</b>

En la siguiente gráfica, se observa la representación de los errores máximo y medios de cada uno de los métodos simplificados para el PE – Etafoam®, en comparación con los datos obtenidos para este mismo material mediante el método tradicional recopilado en el estándar,

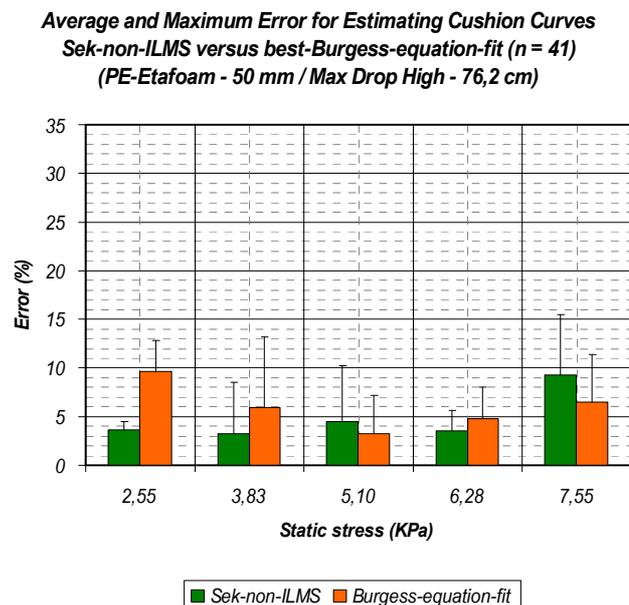


Fig 29. Errores medios y máximos de los dos métodos frente a la tensión estática. PE. Navarro P., 2011.

**5.2. EXPERIMENTO 2.** Selección del material de amortiguamiento óptimo. Desarrollo de un método para la selección del material de amortiguamiento óptimo para la protección de un producto, teniendo en cuenta su capacidad para proteger al producto: características amortiguantes (curvas de amortiguamiento), comportamiento medioambiental y costes asociados a lo largo de todo su ciclo de vida.

El objetivo de este experimento ha sido el desarrollo de una metodología para la selección de un diseño de material de amortiguamiento en el que se contemple la variable funcional, la medioambiental y la económica.

La metodología comienza con el cálculo de los diseños de las protecciones utilizando el método de los seis pasos, el cual obliga a la determinación de las curvas de amortiguamiento de los materiales considerados. En este punto resulta crucial la investigación desarrollada en el experimento 1, donde se validan los métodos abreviados frente al recogido en la norma ASTM D 1596, como métodos viables para la determinación de las curvas de amortiguamiento, dependiendo de la naturaleza del material. No obstante en este experimento 2, las curvas de amortiguamiento de los diferentes materiales seleccionados en el caso práctico, se determinaron siguiendo la norma ASTM D 1596, pero con un equipo mejorado, desarrollado por ITENE, siguiendo las pautas de esta misma norma. De esta manera se pretendía que el conjunto de los dos experimentos resultará más completo, al validar en este segundo experimento las bondades del equipo desarrollado, enumeradas anteriormente en el apartado 4 de materiales y métodos de la presente tesis.

Una vez calculados los diseños de las protecciones interiores para un caso concreto, en este experimento se describe en detalle el caso práctico seleccionado, se realizará la determinación del CRITERIO MEDIOAMBIENTAL y del CRITERIO ECONOMICO, que son los que se utilizarán para realizar el análisis comparativo final, y que como resultado determinará el embalaje óptimo.

No obstante como este resultado depende del peso que se otorgue a cada uno de estos dos criterios, en función de las ideas o motivaciones del decisor, se plantea un análisis de sensibilidad.

Destacar que el cálculo del CRITERIO MEDIOAMBIENTAL y del CRITERIO ECONOMICO, se realizan siguiendo herramientas como el ACV y un modelo económico que se desarrolla para esta metodología de selección. Igualmente se utilizan herramientas de apoyo como el software Multipack – multimix, para calcular la optimización del espacio de carga del producto en función del volumen de los diferentes diseños desarrollados, en el almacén, transporte, entre otros, que influyen directamente sobre el modelo costes desarrollado.

### **Descripción del caso práctico para la validación de la metodología:**

Una empresa fabricante de productos electrónicos, quiere seleccionar el sistema de embalaje de una televisión de 42 pulgadas, para protegerla frente a los riesgos de la distribución como golpes, vibraciones del transporte entre otros, minimizar el impacto ambiental y reducir el coste asociado al material y al transporte etc, Para lograr este objetivo la compañía puede elegir entre los siguientes materiales de amortiguamiento:

- ✓ EPS,
- ✓ Select Blue Etafoam® (non cross-linked PE foam),
- ✓ ML-33 (cross-linked PE foam),

La empresa se encuentra ubicada en Hungría al igual que los proveedores de embalaje, no obstante el televisor de 42 pulgadas una vez embalado es transportado hasta el punto de venta ubicado en Valencia (España). Con el fin de seleccionar un sistema de embalaje y protección optimizado, se tendrán en cuenta los siguientes criterios, para cada uno de los tres materiales de amortiguamiento anteriores:

- ✓ C<sub>1</sub>. Impacto medioambiental,
- ✓ C<sub>2</sub>. Impacto económico,

A modo de resumen se describe cómo se aplicaría la metodología desarrollada y descrita en el punto 4 de materiales y métodos de esta tesis, en particular en el punto 4.2. correspondiente a este experimento, el cual consta de las siguientes fases:

- 5.2.1. Determinación de las propiedades físico – mecánicas: cantidad de amortiguamiento requerido. Diseño optimizado del bloqueo de protección (método de los seis pasos): Criterio Funcional,

Posteriormente, a partir de los diseños optimizados, se determinarán los dos criterios que se tendrán en cuenta para aplicar el análisis comparativo, con el fin de realizar la selección del bloqueo de protección óptimo entre las posibles alternativas contempladas:

- 5.2.2. Estudio del comportamiento medioambiental del bloqueo de material de amortiguamiento en cada una de sus etapas de ciclo de vida: criterio medioambiental (C1)
- 5.2.3. Desarrollo de un modelo de costes para el bloqueo de material de amortiguamiento: criterio económico (C2).
- 5.2.4. Análisis comparativo de las alternativas de bloqueo de material de amortiguamiento en base a los resultados de los dos criterios de selección estudiados.

A continuación se aplica la metodología de selección, siguiendo sus pasos, al caso práctico de validación planteada en este segundo experimento:

### 5.2.1. Determinación de las propiedades físico – mecánicas: cantidad de amortiguamiento requerido, Diseño del bloqueo de protección,

La cantidad de amortiguamiento requerido para proteger un producto en una caída depende de muchos factores:

- La fragilidad del producto,
- La altura de caída,
- El número de veces que será lanzado,
- El material de amortiguamiento,
- El embalaje en sí mismo,

Si se conoce la fragilidad del producto y la altura máxima de caída esperada en el proceso de distribución, entonces se puede emplear la metodología estándar para el diseño del amortiguamiento basada en la Ingeniería del Embalaje, **el método de los seis pasos:**

#### Paso 1. Definir el entorno de distribución.

Es vital conocer que le pasa al producto desde que se fabrica hasta que llega al cliente, Para ello se han de medir las alturas de caída y los niveles de vibración que los productos embalados sufrirán a lo largo del proceso de distribución.

Podemos utilizar tablas donde se muestra el rango esperado de altura de caída dependiendo del peso del embalaje (resultado de estudios realizados por organizaciones americanas: ASTM e ISTA).

También se puede medir el entorno de distribución utilizando embalajes con registradores de impactos y vibraciones,

En el caso particular mostrado en esta investigación, dado que el televisor de 42 pulgadas, tiene un peso de unos 21,5 Kg aproximadamente, usando la tabla que se adjunta, se puede observar como para un nivel de seguridad I, la altura de caída es de 91 cm. Cuando se diseña un amortiguamiento para un producto de elevado valor añadido y un daño no puede ser tolerado, se utiliza el nivel I.

En nuestro caso hemos obtenido las curvas de amortiguamiento de los tres materiales objeto de estudio para una altura de 90-91 cm, entre otras h representativas.

Tabla 8. Valores de la altura de caída en función del peso del producto y diferentes niveles de seguridad, Root, 1997.

Peso (kg)	Nivel de seguridad y altura de caída a seleccionar.		
	I	II	III
<10	122	76	46
11-20	107	61	38
21-30	91	46	31
31-40	76	46	23
41-50	61	46	16
51-100	46	46	16
101-300	31	23	8
>300	23	16	8

## Paso 2. Analizar la fragilidad del producto,

Es vital conocer los elementos críticos que hay en un producto y sus características físicas, como su frecuencia natural, y el nivel de g's máximo que puede soportar ante un impacto. En el caso particular de nuestro estudio, se ha asumido una fragilidad de **60 g's**, dato obtenido de la siguiente tabla comúnmente utilizada, resultante de estudios publicados:

Tabla 9. Valores de fragilidad en función de diferentes tipos de producto, Root, 1997.

Producto	Fragilidad
Extremadamente frágil (equipos de precisión)	15 – 25 g's
Muy sensible (aparatos medicos)	20 - 40 g's
Delicado (computadoras)	40 – <b>60 g's</b>
Moderadamente frágil (Hi-Fi, TV)	60 – 85 g's
Poco delicado (muebles)	85 – 115 g's
No frágil (maquinaria)	> 115 g's

La tabla que se adjunta muestra la fragilidad de diferentes tipologías de productos. Fue obtenida mediante ensayos de caída y debe ser usada como una guía únicamente. La fragilidad exacta de un producto en particular puede ser obtenida únicamente mediante ensayos de caída del producto en sí. El procedimiento para realizarlo está en las norma ASTM D3332.

**Paso 3. Rediseño del producto.** Este paso no es obligatorio, por lo que en la validación de esta metodología, se ha obviado y se pasa al paso 4.

## Paso 4. Evaluar el material o materiales de amortiguamiento

El procedimiento estándar para diseñar un amortiguamiento para un producto implica el uso de datos de comportamiento del material. Esta información viene generalmente en forma de las llamadas "Curvas de Amortiguamiento",

Las muestras eran de 15 × 15 cm y 50 mm de espesor y con las siguientes densidades;

- EPS (10 kg/m<sup>3</sup>), ML – 33 (30 kg/m<sup>3</sup>), Select Azul Etafoam® (29 kg/m<sup>3</sup>),

Las densidades utilizadas se seleccionaron, por ser las más habituales en este tipo de bloqueos. Para ello se entrevistaron a varios proveedores: fabricantes y transformadores de estos materiales de amortiguamiento. A continuación, se adjuntan los resultados de la caracterización de las espumas de EPS, Select Azul Etafoam® (espuma de polietileno no reticulado) y ML 33 (espuma de polietileno reticulada), según la norma ASTM D1596, es decir las curvas de amortiguamiento de cada material, agrupadas por las diferentes alturas de caída:

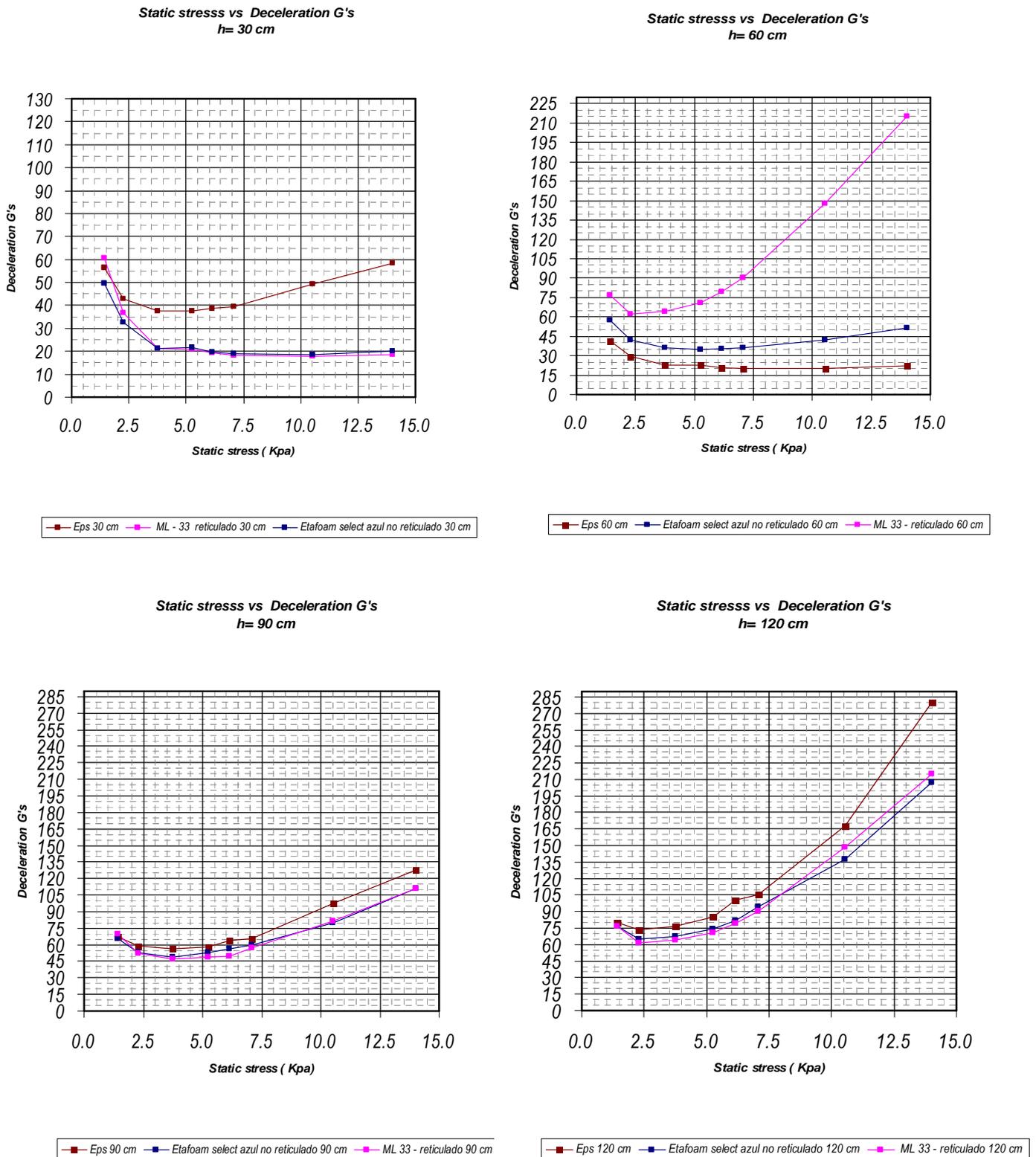


Figure 30. Cushion curves for the three-cushion material and 30, 60, 90, 120 cm (h of design), Navarro P. 2011.

### Paso 5. Diseñar el embalaje.

Centrándonos solamente en el material de amortiguamiento deberemos de aplicar el procedimiento estándar para el diseño del amortiguamiento:

Elegir un material cuya curva de amortiguamiento esté disponible mediante el ensayo correspondiente descrito en la ASTM D1596 o bien mediante los métodos abreviados descritos en el experimento 1 (M, Sek, G, Burgess). En este caso de estudio, se obtuvieron las curvas de amortiguamiento de los materiales objeto de estudio, mediante la norma ASTM D 1596.

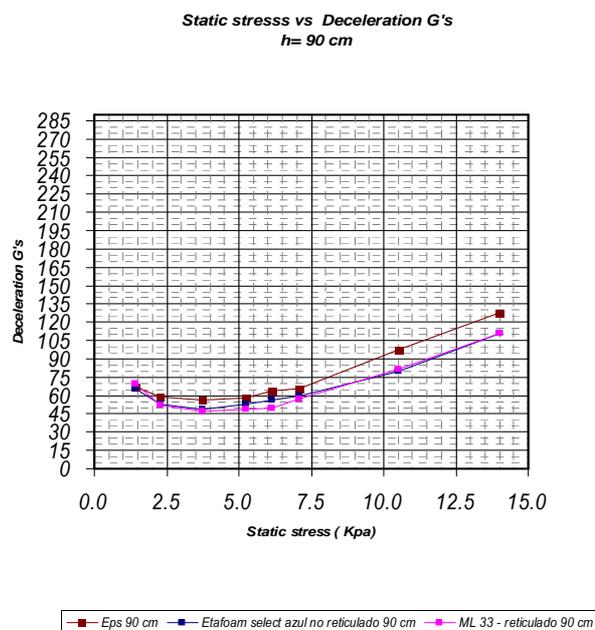
Elegir una altura de caída de diseño. Esta debería de coincidir con la que se espera durante su distribución o manutención. La tabla de altura de caída esperada puede ser utilizada como guía. Más preciso es medir la altura de caída del ambiente de distribución mediante registradores de impacto.

- ✓ H caída= 90 cm, (altura seleccionada en el caso de estudio de este 2º experimento). En este caso, el dato se ha tomado de la tabla 8.

Determinar la fragilidad del producto en g's. Se puede estimar utilizando la tabla de fragilidades como guía o medirla experimentalmente mediante el ensayo correspondiente ASTM D3332 o mediante otras técnicas descritas anteriormente.

**G´ s= 60.** Este dato es de la tabla 6.

Identificar el espesor de material de amortiguamiento mínimo. En la gráfica de curvas de amortiguamiento correspondiente a un material y altura de diseño de caída, se traza una línea horizontal con el valor de la fragilidad del producto. Cualquiera de las curvas que queden por debajo pueden ser usadas. El más fino será también el más económico.



$$\sigma_s = \frac{\text{Peso}}{\text{Area}} \quad [1]$$

Figure 31. Curvas de amortiguamiento de los tres materiales objeto de estudio y para una altura de caída de 90 cm, Navarro P., 2011.

La tensión estática más elevada dentro del rango permitido es la que se utiliza debido a que cumple con la menor cantidad de material, A partir de la tensión estática y el peso del producto, se obtiene el área optimizada del material.

Decidir la forma del material de amortiguamiento. El área anteriormente calculada es la total necesaria para proteger al producto en una caída desde una altura de diseño, si el correspondiente espesor es usado y el producto tiene una fragilidad concreta. Luego manteniendo el área obtenida se puede distribuir libremente, con la forma que se desee, En el caso de estudio descrito en este 2º experimento para la validación de la metodología de selección, se propusieron estos dos tipos de bloqueos para espumas de polietileno (PE):

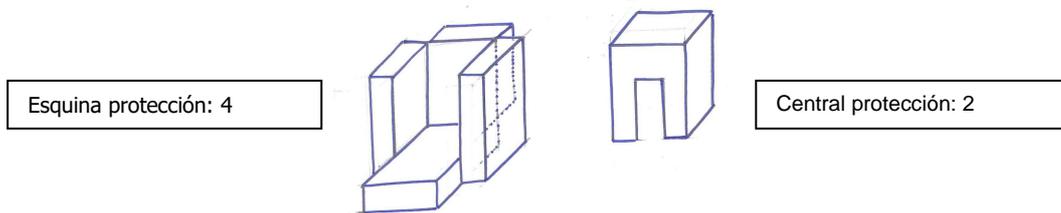


Figure 32. Protección diseñada para PE foam; non-cross linked (Select Blue Etafoam®), and cross-linked (ML – 33)

A partir de las curvas de amortiguamiento de cada uno de los materiales se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 10. Tabla resumen del peso de cada una de las protecciones diseñadas en función de sus prestaciones físico – mecánicas (curvas de amortiguamiento).

Material	Protección diseñada	kg/m <sup>3</sup>	Static stress (kpa)	Kg/cm <sup>2</sup> 1kg/cm <sup>2</sup> = 100 Kpa	V t (cm <sup>3</sup> )	Kg/protección		Kg total
EPS	Esquina protección (4 unidades)	10	real	real	real	<b>0,1434</b> (4 unidades)		<b>0,5736</b>
Etafoam® select blue, (PE) non-cross - linked	Esquina protección (4 unidades )	29	7,083	0,071	3642,228	<b>0,10562</b> ( 1 unidad)	<b>0,4225</b> (4 unidades)	<b>0,5327</b>
	Central protección (2 unidades )				1900	<b>0,05510</b> (1 unidad)	<b>0,1102</b> (2 unidades)	
ML-33 negro, (PE) cross-linked	Esquina protección (4 unidades )	30	7,813	0,078	3642,228	<b>0,10927</b> (1 unidad)	<b>0,4371</b> (4 unidades)	<b>0,5511</b>
	Central protección (2 unidades )				1900,000	<b>0,05700</b> (1 unidad)	<b>0,1140</b> (2 unidades)	

**Paso 6. Validación de los prototipos calculados mediante este método, a través de los ensayos de simulación de los riesgos de la distribución.** Este paso aparece en el método original, pero en este experimento no se pretendió llegar hasta la fase de construir un prototipo y validarlo mediante ensayos.

Una vez diseñado el bloqueo para los materiales de amortiguamiento objeto de estudio, se determinan los criterios medioambiental (C<sub>1</sub>) y criterio económico (C<sub>2</sub>) para cada uno de los tres materiales, utilizando el análisis de ciclo de vida simplificado y el modelo de costes desarrollado a medida para la metodología de selección, objetivo de esta tesis:

### 5.2.2. Estudio del comportamiento medioambiental del bloqueo de material de amortiguamiento en cada una de sus etapas de ciclo de vida, Análisis de ciclo de vida: criterio medioambiental (C<sub>1</sub>).

En el caso de estudio expuesto en este 2º experimento para validar la metodología de selección de la protección que ofrezca un mayor grado de optimización, se realiza la comparación medioambiental de tres materiales de amortiguamiento, EPS (poliestireno expandido, densidad; 10 kg/m<sup>3</sup>), espuma de PE (polietileno) no reticulado (Select Azul Etafoam®, densidad; 29 kg/m<sup>3</sup>) y reticulada (ML – 33, densidad; 30 kg/m<sup>3</sup>), utilizados para el desarrollo y fabricación de bloqueos internos de embalaje, mediante el uso de Análisis de ciclo de vida (ACV), como herramienta para llevar a cabo el estudio del comportamiento medioambiental en cada uno de los tres. Para ello se estudiaron los tres bloqueos, el actual de EPS y los otros dos diseñados a partir de las curvas de amortiguamiento de cada material,

para proteger a un televisor de 42 pulgadas frente a los riesgos de su ciclo de almacenamiento y distribución característicos.

Se pretenden identificar las etapas del ciclo de vida más impactantes para el medio ambiente, en cada uno de los tres bloqueos objeto de estudio, con el fin de comparar el comportamiento medioambiental en cada uno de los casos, La elección de estos tres materiales de amortiguamiento se fundamenta en un estudio del sector de envase y embalaje tanto a nivel de fabricantes y transformadores como de usuarios, teniendo en cuenta los requerimientos de protección del producto (televisión de 42 pulgadas);

- EPS (poliestireno expandido): 5.2.2.1.
- Select Azul Etafoam® (espuma de polietileno no reticulada):5.2.2.2.
- ML – 33 (espuma de polietileno reticulada):5.2.2.3.

En este apartado es donde se desarrollará un ACV simplificado de cada uno de los tres bloqueos o evaluación simplificada, La metodología de análisis de ciclo de vida es la propuesta por el SETAC, se utiliza el programa SimaPro 7,0,2, de PRÉ Consultants, con el Ecoindicator 99-I/I (versión individualista) para realizar los cálculos así como las bases de datos sobre el impacto asociado al procesamiento de materias primas, fabricación del bloqueo, transporte y tratamiento de residuos,

#### **5.2.2.1. Análisis de ciclo de vida del bloqueo de poliestireno expandido (EPS):**

El objetivo de este análisis, es la evaluación de los impactos ambientales derivados de los bloqueos de poliestireno expandido, espuma de polietileno no reticulada (Select Azul, Etafoam®) y reticulada (ML – 33), habitualmente utilizados para bloquear televisores de 42 pulgadas, una vez que son introducidos en el embalaje secundario de cartón ondulado, con el fin de proteger el producto frente a vibraciones y posibles impactos a lo largo de su ciclo de almacenamiento y distribución.

#### **Resultados del Análisis de ciclo de vida del bloqueo de poliestireno expandido, SITUACION ACTUAL.**

##### Unidad funcional

La unidad funcional son los bloqueos de poliestireno expandido colocados de forma estratégica en un televisor de 42 pulgadas, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:



*Fig 33. Bloqueo de EPS.*

**El peso de los bloques de poliestireno expandido es de 0,5736 Kg con una densidad media de 10 Kg/m<sup>3</sup>.**

### **Sistema estudiado**

El sistema se subdivide en los siguientes subsistemas:

- Procesamiento de las materias primas, Fabricación del bloqueo de EPS.
- Transporte del bloqueo de poliestireno expandido desde la empresa fabricante del embalaje hasta la empresa fabricante del producto.
- Transporte del televisor una vez embalado desde la empresa fabricante hasta la superficie de distribución.
- Transporte desde la superficie de distribución hasta el domicilio del consumidor.
- Transporte desde el punto de recogida del bloqueo de EPS una vez convertido en residuo, hasta los diferentes escenarios contemplados para su disposición final.
- Disposición final del bloqueo de EPS, Se han considerado los siguientes escenarios (Anape 2001):
  - Vertedero: 72 %
  - Reciclaje: 28 %

A continuación se muestra el esquema del ciclo de vida del bloqueo de poliestireno expandido:

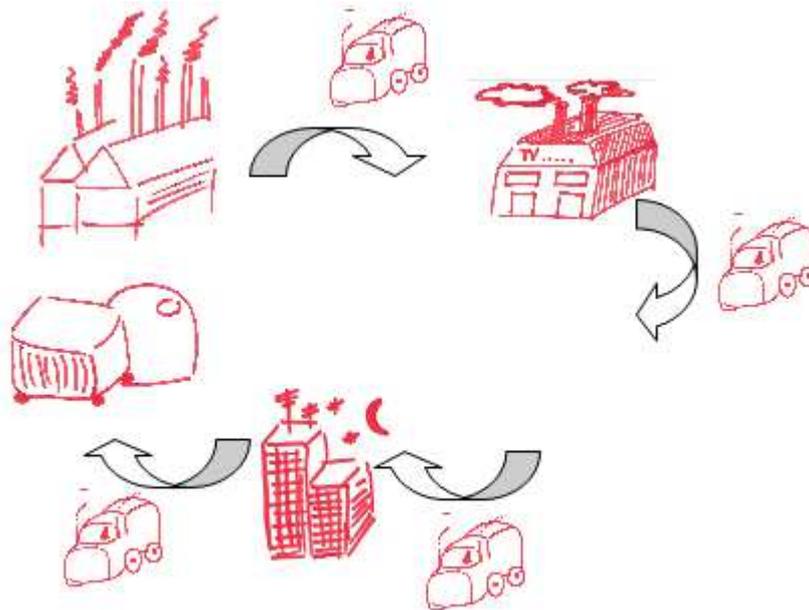


Fig 34. Ciclo de vida del bloque de EPS.

### **Límites del sistema estudiado, Bloqueo de EPS,**

- Se ha considerado la etapa de extracción de las materias primas para la obtención del poliestireno expandido, así como el transporte del material hasta el punto de fabricación del bloque de EPS.
- Se considera que para la fabricación del bloque de EPS, se ha utilizado materia prima virgen, en un 85 % y material reciclado en un 15 %, (Anape 2001).
- No se considera el impacto medioambiental debido a la etapa de uso del bloque, por considerarse de bajo impacto.
- No se consideran los envases y/o embalajes así como elementos auxiliares utilizados para hacer llegar los bloques de poliestireno expandido a la fábrica de televisores donde serán aplicados.
- No se consideran los impactos del embalaje exterior del televisor, como podría ser la caja de cartón ondulado doble – doble (BC), la bandeja de cartón ondulado posicionadora, palets etc, por considerarse común para los tres ciclos de vida, Destacar que la caja de cartón ondulado con el bloque EPS es mayor frente a los de espuma de polietileno reticulada y sin reticular, ya que el bloque de EPS es de mayores dimensiones. No obstante se considera poco relevante el impacto asociado a la caja de cartón ondulado exterior. En este sentido lo que realmente influye es el pasar de un bloque de EPS a uno de espuma de polietileno (PE), que reduce el volumen total utilizado por tv, aumenta el número de televisores de 3 a 4 por paleta, disminuyendo el impacto medioambiental asociado a este transporte de distribución del producto.

Igualmente se han recopilado datos procedentes de experimentos y otras publicaciones especializadas de fabricantes, usuarios e incluso asociaciones empresariales etc.

### **Reglas de asignación de las cargas ambientales:**

En el caso de los datos obtenidos a partir de las bases de datos, las cargas ambientales han sido asignadas por los creadores de las bases de datos.

En el caso del impacto ambiental asociado a cada uno de los transportes contemplados en el sistema, la asignación de las cargas ambientales se ha realizado por peso.

### **Hipótesis planteadas:**

#### **1. Distribución de los bloqueos y del producto embalado:**

- La distribución del bloqueo de poliestireno expandido se considera en el país fabricante del producto (tv de 42 pulgadas); Hungría, con una distancia media de 120 Km entre el fabricante del bloqueo de EPS y el fabricante de la tv.
- La distancia desde la fábrica del producto hasta que llega al punto de venta: Valencia, España, es de 3.941 Km.
- Posteriormente, entre la superficie de distribución y el domicilio del consumidor, se considera una distancia de 30 km.
- Punto de recogida del EPS al centro de reciclaje y vertedero,
- Se han seleccionado camiones de 16 Tn. Los camiones van llenos, con los bloqueos de EPS, así como en el caso del producto embalado y vacíos en los transportes de vuelta.
- El peso total de los bloqueos de EPS es de 0,5736 kg. A efectos de cálculo se consideran los 4 bloqueos del mismo peso: 0,1433 g/bloqueo de EPS.

#### **2. Tratamiento de los residuos**

Únicamente se considera como residuo el bloqueo de poliestireno expandido, que llega a los consumidores y es recogido por el camión de la basura, clasificado y posteriormente reciclado para la obtención de granza, habiendo un porcentaje destinado a vertedero. Los porcentajes considerados en cada caso son:

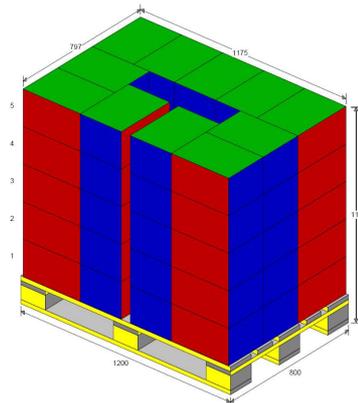
- Vertedero: 72 %
- Reciclaje: 28 %

Estos porcentajes han sido considerados a partir de los datos recopilados de publicaciones especializadas de ANAPE, 2001.

**3. Transporte 1, del bloqueo de poliestireno expandido desde la empresa fabricante del embalaje hasta la empresa fabricante del producto.**

Consideramos la empresa fabricante de los bloqueos de EPS en Hungría, al igual que la empresa fabricante de televisores, con una distancia entre ambas de 120 Km.

Cálculo tnkm asociadas al transporte: Para ello se utiliza un camión de 16 tn, con una capacidad de 22 palets de 1.200 × 800 mm (remontando sobre los 11 de la base), Se ha calculado que la cantidad de bloqueos de EPS por palet de 1,20 de altura de paletización es de 55 uds.



*Figure 35, EPS protecciones moldeadas y paletizadas (1,200 × 800 mm), 55 eps protecciones/palet.*

**4. Transporte 2, del televisor una vez embalado desde la empresa fabricante (Hungría) hasta la superficie de distribución (Valencia, España).**

La distancia considerada en este segundo transporte es de 3.941 Km.

Cálculo tnkm asociadas al transporte: En un camión de 16 tn, se pueden transportar 11 palets en la base. En la distribución de este producto dado su valor y fragilidad, no se remontan los palets durante el transporte. A partir de las dimensiones del embalaje actual del televisor, en un palet de 1.200 × 800 mm, se pueden ubicar 3 televisores.

**5. Transporte 3, desde la superficie de distribución hasta el domicilio del consumidor.** La distancia considerada para este tercer transporte es de 30 Km,

Cálculo tnkm asociadas al transporte: Se supone el embalaje de un televisor (4 bloqueos de EPS).

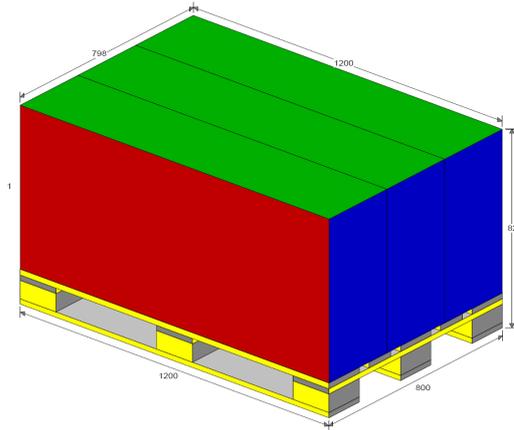


Figure 36. TV set embalado con protecciones de EPS (1,200 × 800 mm), Dimensión de la caja de c.o.: 1203×266×682 mm.

## 6. Transporte 4, de los residuos.

La distancia media considerada entre el punto de recogida del bloqueo de poliestireno expandido y la planta donde se efectuará el reciclado incluyendo el vertedero es de 40 Km.

Cálculo tnkm asociadas al transporte: Se supone el embalaje de una tele (4 bloques de EPS).

En los cuatro transportes descritos el camión utilizado es de 16 tn , el cual va lleno a la ida y vuelve vacío, Igualmente las distancias consideradas para cada uno de los transportes, son distancias medias.

## Análisis del inventario

El análisis de inventario comprende los siguientes procesos:

- **Procesamiento de las materias primas,**

Se ha considerado el proceso de extracción de las materias primas, el proceso de transformación desde la granza al material poliestireno expandido, considerando el proceso a partir del cual se forma el bloqueo específico para la protección del televisor (Polystyrene, high impacto HIPS at plant). Se ha considerado que este último proceso se ha realizado a partir de un molde específico diseñado en función de los requerimientos del producto así como de su ciclo de almacenamiento y distribución. Tanto los datos de la transformación de la granza en poliestireno expandido como el proceso de moldeo necesario para la obtención del bloqueo se han obtenido a partir de las bases de datos del programa SimaPro 7.0.2. El peso de los 4 bloques de EPS considerado es de 0,5736 Kg. La merma de granza para la obtención del bloqueo es de un 4,16 % (dato obtenido a partir de las ases de datos del programa).

- **Transporte del bloqueo de poliestireno expandido desde la empresa fabricante del embalaje hasta la empresa fabricante del producto.**

Consideramos la empresa fabricante de los bloqueos de EPS en Hungría, al igual que la empresa fabricante de televisores, con una distancia entre ambas de 120 Km.

- **Transporte del televisor una vez embalado desde la empresa fabricante (Hungría) hasta el centro la superficie de distribución (Valencia, España).**

La distancia considerada en este segundo transporte es de 3.941 Km.

- **Transporte desde la superficie de distribución hasta el domicilio del consumidor.** La distancia considerada para este tercer transporte es de 30 Km.

- **Transporte de los residuos.**

La distancia media considera entre el punto de recogida del bloqueo de poliestireno expandido y la planta donde se efectuarán los tratamientos especificados anteriormente incluyendo el vertedero, es de 40 Km.

Estos cuatro transportes se realizan con un camión de 16Tn de la base de datos Buwal 250.

- **Disposición final del bloqueo de EPS:**

Se han considerado los siguientes escenarios de disposición final:

- Vertedero: 72 %
- Reciclaje: 28 %

Estos porcentajes han sido considerados a partir de los datos recopilados en publicaciones especializadas de ANAPE, 2001.

A continuación se adjunta la gráfica de caracterización del ciclo de vida del bloqueo de EPS:

#### **Resultados de la evaluación ambiental del bloqueo de EPS:**

- 1.** El impacto del bloqueo de poliestireno expandido es debido principalmente a su etapa de transporte.
- 2.** La etapa de obtención del bloqueo presenta menores aportaciones a la mayoría de categorías de impacto (excepto para las categorías de impacto: Minerales y Uso de la tierra), como consecuencia del porcentaje de grana de poliestireno reciclada considerada en el análisis (15 %).
- 3.** Destacar que la disposición final del bloqueo presenta una aportación porcentual negativa a la categoría de impacto Minerales como consecuencia del porcentaje de reciclado considerado (28 %).

### **5.2.2.2. Resultados del Análisis de ciclo de vida del bloqueo de PE no reticulado Select Azul, Etafoam®.**

#### **Unidad funcional.**

La unidad funcional son los bloqueos de espuma de PE no reticulado Select Azul, Etafoam®, colocados de forma estratégica en un televisor de 42 pulgadas. El peso de los bloqueos de espuma de PE no reticulado Select Azul, Etafoam® es de 0,5327 Kg.

Se ha realizado el diseño aproximado de los bloqueos de las espumas de polietileno que serían válidos para las espumas de polietileno no reticuladas así como para la reticulada, siguiendo las pautas de la metodología de los seis pasos.

Los bloqueos desarrollados, se han realizado a partir de los cálculos teniendo en cuenta (apartado 5.2.):

- Fragilidad del producto: **60 (G's)**.
- Altura de caída a partir de la cual se ha realizado el diseño del bloqueo: **90 cm**.
- Las curvas de amortiguamiento de este material.

#### **Sistema estudiado**

El sistema se subdivide en los siguientes subsistemas:

- Procesamiento de las materias primas para la fabricación de plancha de espuma de PE no reticulada, Select Azul, Etafoam®.
- Transformación de la plancha de espuma de PE no reticulada, Select Azul, Etafoam®, en el bloqueo específico para la protección del producto en función del diseño desarrollado a partir de las curvas de amortiguamiento del material, mediante la operación de troquelado.
- Transporte de las planchas de espuma de PE no reticulada Select Azul, Etafoam®, hasta el transformador, ( $T_0=100$  km).
- Transporte del bloqueo de espuma PE no reticulada (Select Azul, Etafoam®) desde la empresa fabricante del embalaje hasta la empresa fabricante del producto, ambos dos ubicados en Hungría, ( $T_1=120$  km).
- Transporte del televisor una vez embalado desde la empresa fabricante (Hungría) hasta el punto de venta (Valencia, España), ( $T_2=3.941$  Km).
- Transporte desde la superficie de distribución hasta el domicilio del consumidor: 30 Km, ( $T_3=30$  km).
- Transporte desde el punto de recogida del bloqueo de PE no reticulado (Select Azul Etafoam®), una vez convertido en residuo, hasta los diferentes escenarios contemplados para su disposición final, ( $T_4= 40$  Km).
- Disposición final del bloqueo de espuma de PE no reticulado, Select Azul Etafoam®:
  - Reciclado: 8 %
  - Vertedero: 92%

Estos porcentajes han sido considerados a partir de los datos recopilados del transformador de la espuma de polietileno no reticulada Select Azul, Etafoam®; Modisprem.

A continuación se muestra el esquema del ciclo de vida del bloqueo de espuma de PE no reticulada, Select Azul Etafoam®:

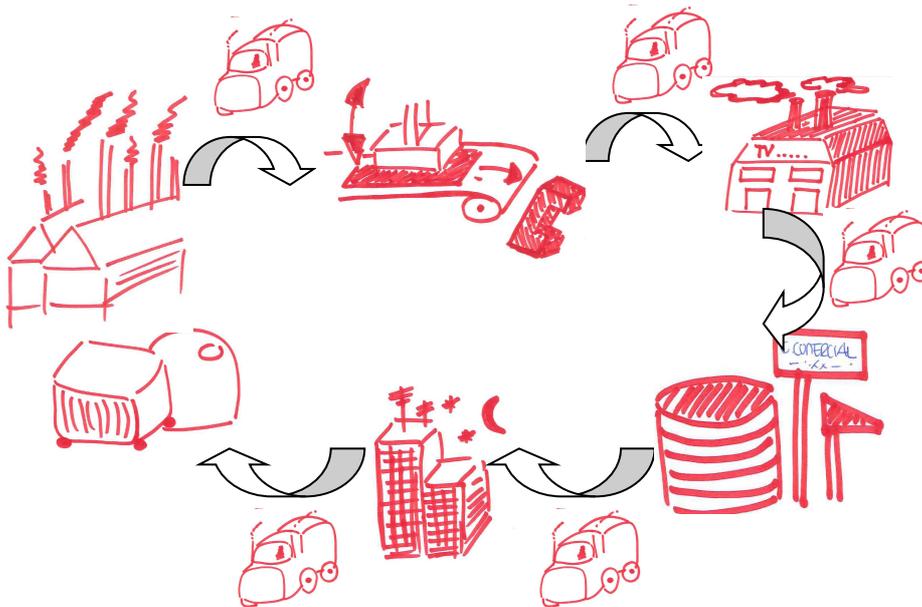


Fig. 37. Esquema del ciclo de vida del Select Azul Etafoam®.

#### Límites del sistema estudiado,

- Se ha considerado que el bloqueo de espuma de polietileno, Select Azul, Etafoam® se ha fabricado a partir de materia prima reciclada en un 10 % (dato facilitado por su transformador: Modisprem) y por lo tanto por un 90% de materia virgen.
- No se considera el impacto medioambiental debido a la etapa de uso del bloqueo, por considerarse de bajo impacto.
- No se consideran los envases y/o embalajes así como elementos auxiliares utilizados para hacer llegar los bloqueos de espuma de PE no reticulada, Select Azul, Etafoam®, a la fábrica de televisores donde serán aplicados.
- No se consideran los impactos del embalaje exterior del televisor, como podría ser la caja de cartón ondulado doble – doble (BC), la bandeja de cartón ondulado posicionadora, palets etc, por considerarse común para los tres ciclos de vida. Destacar que la caja de cartón ondulado con el bloqueo EPS es mayor frente a los de espuma de polietileno reticulada y sin reticular, ya que el bloqueo de EPS es

de mayores dimensiones. No obstante se considera poco relevante el impacto asociado a la caja de cartón ondulado exterior. En este sentido lo que realmente influye es que de utilizar un bloqueo de EPS a uno de espuma de polietileno, se reduce el volumen total utilizado por tv, aumenta el número de televisores de 3 a 4 por paleta, disminuyendo el impacto medioambiental asociado a este transporte de distribución del producto.

### **Reglas de asignación de las cargas ambientales:**

En el caso de los datos obtenidos a partir de las bases de datos, las cargas ambientales han sido asignadas por los creadores de las bases de datos.

En el caso del impacto ambiental asociado a cada uno de los transportes contemplados en el sistema, la asignación de las cargas ambientales se ha realizado por peso.

### **Hipótesis planteadas:**

#### **1. Distribución de los bloqueos y del producto embalado:**

- La distancia entre la empresa fabricante de las planchas de espuma de polietileno no reticulada, Select Azul, Etafoam® y el transformador para la obtención de las dos tipologías de bloqueos necesarios, por medio de una troqueladora (el utillaje necesario se desarrolla en función del diseño de ambos bloqueos), es de 100 km.
- La distribución del bloqueo de espuma de polietileno no reticulada, Select Azul, Etafoam®, se considera en el país fabricante del producto (tv de 42 pulgadas); Hungría, con una distancia media de 120 Km.
- La distancia desde la fábrica del producto hasta que llega al punto de venta: Valencia, España, es de 3.941 Km.
- Posteriormente, entre la superficie de distribución y el domicilio del consumidor, se considera una distancia de 30 km.
- En el caso del transporte de las planchas de espuma de PE, se considera que van remontados y que se utilizan palets de 1,200 × 800 mm, con un altura de paletización de 1.200 mm, un total de 21 planchas por palet con unas dimensiones de 1.200 × 800 × 50 mm, por lo que el camión tiene una capacidad de 22 palets (11 + 11).
- Los bloqueos de las equinas (4 unidades/tv) de espuma de polietileno, se suministran en plano y se considera que se necesitan el doble de palets de este tipo de bloqueo, frente a los 2 bloqueos centrales necesarios por cada tv. Por lo que en un camión de 16 tn, se ha estimado que se necesitan 7 palets de bloqueos centrales y 14 palets de bloqueos para las esquinas.
- En el caso del transporte del producto, no se remontan los palets, por cuestiones de seguridad, por lo que sólo caben 11 palets.
- Se han seleccionado camiones de 16 tn, Los camiones van llenos, con los bloqueos de espuma de polietileno, así como en el caso del producto embalado y vacíos en los transportes de vuelta.

## 2. Tratamiento de los residuos.

Únicamente se considera como residuo del bloqueo de espuma de polietileno, no reticulada Select Azul, Etafoam®, el que llega a los consumidores y es recogido por el camión de la basura, clasificado y posteriormente reciclado para la obtención de granza, habiendo un porcentaje destinado a vertedero. Los porcentajes considerados en cada caso son:

- Reciclaje: 8 %
- Vertedero: 92%

Estos porcentajes han sido considerados a partir de los datos recopilados del transformador de la espuma de polietileno no reticulada Select Azul, Etafoam®; Modisprem.

## 3. Transporte 0, de la plancha de PE no reticulada, desde la empresa fabricante hasta el transformador para la obtención por troquelado de los dos bloques desarrollados para este material.

Consideramos la empresa fabricante de los bloques de PE no reticulado (Select Azul, Etafoam®) en Hungría, al igual que la empresa fabricante de televisores, con un distancia entre ambas de 100 Km.

Cálculo tnkm asociadas al transporte: Las planchas de espuma de PE tiene unas dimensiones de 1,200 × 800 × 50 mm, teniendo en cuenta que pueden ponerse 21 planchas por palet, En el camión se transportan los palets a dos alturas: 22 paletas /camión.

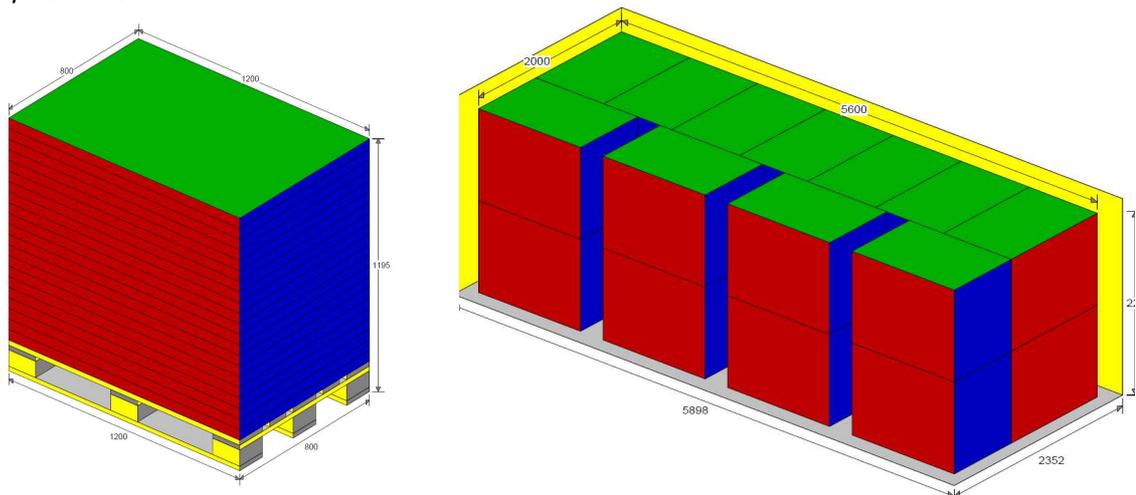


Figure 38. Láminas de Select Blue Etafoam® and ML-33 paletizadas (1,200 × 800 mm) y cargadas en un camión (5,898 × 2,352 × 2,500 mm).

4. **Transporte 1**, del bloqueo de PE no reticulado, desde la empresa fabricante del embalaje hasta la empresa fabricante del producto, Consideramos la empresa fabricante de los bloques de PE no reticulado (Select Azul, Etafoam®), en Hungría, al igual que la empresa fabricante de televisores, con un distancia entre ambas de 120 Km.

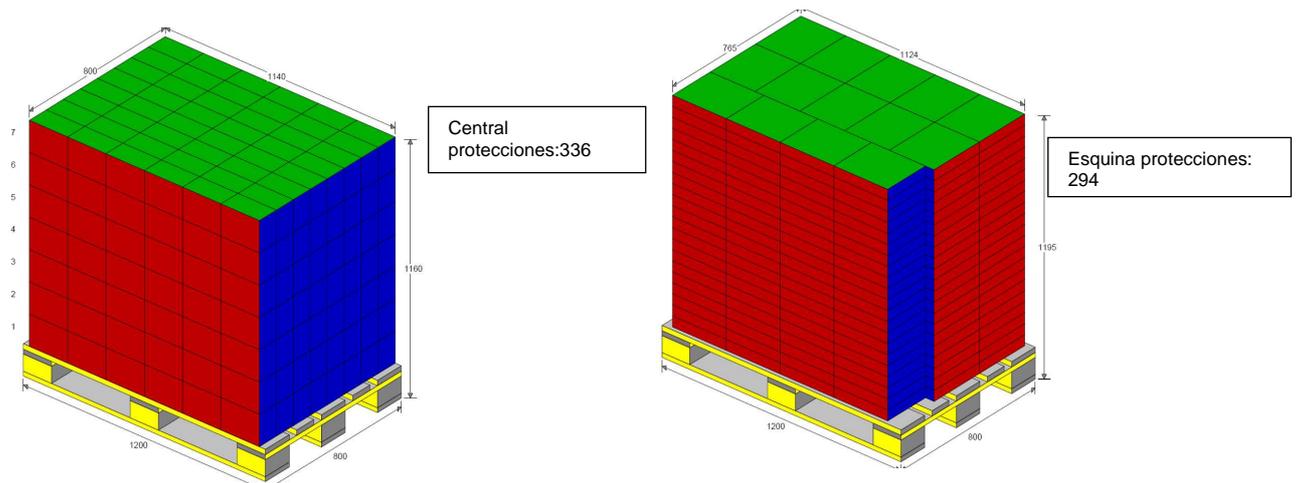


Figure 39. Protecciones centrales y de esquina de Select Blue Etafoam® and ML-33 paletizadas (1,200 × 800 mm).

5. **Transporte 2**, del televisor una vez embalado desde la empresa fabricante (Hungría) hasta la superficie de distribución (Valencia, España), La distancia considerada en este segundo transporte es de 3.941 Km.

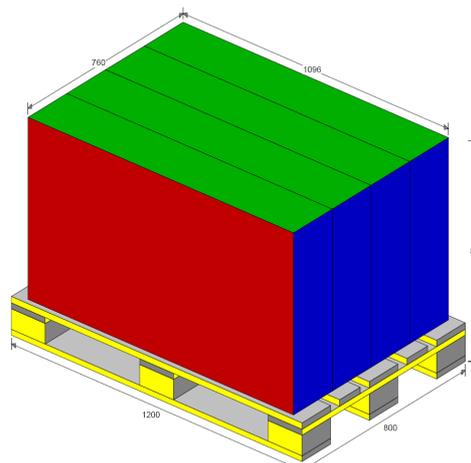


Figure 40. TV embalada con protecciones de Select Blue Etafoam® o ML-33 (1,200 × 800 mm), Dimensiones de la caja de cartón ondulado 1,096 × 190 × 675 mm.

**6. Transporte 3, desde la superficie de distribución hasta el domicilio del consumidor.**

La distancia considerada para este tercer transporte es de 30 Km.

**7. Transporte 4, de los residuos,**

La distancia media considerada entre el punto de recogida del bloque de PE no reticulado (Select Azul, Etafoam®) y la planta donde se efectuará el reciclado incluyendo el vertedero es de 40 Km.

En los cinco transportes descritos el camión utilizado es de 16 tn, el cual va lleno a la ida y vuelve vacío, Igualmente las distancias consideradas para cada uno de los transportes, son distancias medias.

Nota: Para la determinación del espacio de carga, se ha utilizado el software multipack – multimix.

**Análisis del inventario**

El análisis de inventario comprende los siguientes procesos:

- **Procesamiento de las materias primas,**

Se ha considerado el proceso de extracción de las materias primas, el proceso de transformación desde la granza a la espuma de polietileno no reticulada, considerando el proceso de troquelado para desarrollar los dos tipos de protecciones necesarias para la protección del televisor. Tanto los datos de la transformación de la granza en espuma de polietileno no reticulada, como el proceso de troquelado, necesario para la obtención de los dos tipos de bloqueos, se han obtenido a partir de las bases de datos del programa SimaPro 7,0,2, (Polyethylene LDPE granulate at plant, Cutting rolls of triples compound foils). El peso de los bloques de espuma de polietileno no reticulada Select Azul Etafoam®, necesarios para la protección de una televisión es de 0,5327 Kg. Se ha considerado que la merma de granza para la obtención de la plancha de espuma de polietileno es despreciable.

- **Transporte de la plancha de espuma de polietileno no reticulada Select Azul, Etafoam®, desde la empresa fabricante hasta el transformador,**

Consideramos que la empresa fabricante de las planchas de espuma de polietileno no reticulada Select Azul, Etafoam® se encuentra en Hungría, al igual que el transformador para troquelar los dos bloques necesarios, con un distancia entre ambas de 100 Km.

- **Transporte del bloqueo de espuma de polietileno no reticulada Select Azul, Etafoam®, desde la empresa fabricante del embalaje (transformador) hasta la empresa fabricante del producto.**

Consideramos la empresa fabricante de las planchas de espuma de polietileno no reticulada Select Azul, Etafoam® se encuentra en Hungría, al igual que la empresa fabricante de televisores, con un distancia entre ambas de 120 Km.

- **Transporte del televisor una vez embalado desde la empresa fabricante (Hungría) hasta el centro la superficie de distribución (Valencia, España).**

La distancia considerada en este segundo transporte es de 3.941 Km.

- **Transporte desde la superficie de distribución hasta el domicilio del consumidor.**

La distancia considerada para este tercer transporte es de 30 Km.

- **Transporte de los residuos.**

La distancia media considerada entre el punto de recogida del bloqueo de espuma de polietileno no reticulada Select Azul, Etafoam® y la planta donde se efectuarán los tratamientos especificados anteriormente incluyendo el vertedero es de 40 Km.

Estos cuatro transportes se realizan con un camión de 16tn de la base de datos Buwal 250.

- **Disposición final del bloqueo de espuma de polietileno no reticulada, Select Azul, Etafoam® :**

Se han considerado los siguientes escenarios de disposición final:

- Vertedero: 92 %
- Reciclaje: 8 %

Estos porcentajes han sido considerados a partir de los datos recopilados del transformador de la plancha de espuma de polietileno: Modisprem.

### **Resultados de la evaluación ambiental del bloqueo de espuma de PE no reticulada Select Azul Etafoam®:**

1. El impacto del bloqueo de espuma de PE no reticulada (Select Azul, Etafoam®) es debido principalmente a su etapa de transporte.
2. La etapa de obtención del bloqueo presenta mayores aportaciones en comparación con la etapa de obtención del bloqueo de EPS a la mayoría de categorías de impacto, como consecuencia del menor porcentaje de granza reciclada considerada en el proceso (10 % frente al 15 % del bloqueo de EPS), en las categorías de impacto: Respiración de orgánicos y Uso de la tierra.

3. La etapa de transporte de este bloqueo presenta aportaciones porcentuales menores en las categorías de impacto: Uso de la tierra, Cambio climático y Carcinogénicos, como consecuencia de la reducción de la cantidad de embalaje que aumenta el grado de optimización del transporte.
4. Destacar que la disposición final del bloqueo presenta una aportación porcentual negativa menor a la categoría de impacto Minerales como consecuencia del bajo porcentaje de reciclado considerado (8 %).

### **5.2.2.3. Resultados del Análisis de ciclo de vida del bloqueo de espuma de PE reticulada ML – 33.**

#### **Unidad funcional**

La unidad funcional son los bloqueos de espuma de PE reticulada ML – 33, colocados de forma estratégica en un televisor de 42 pulgadas. El peso de los bloqueos de espuma de PE reticulada es de 0,5511 Kg.

Se han realizado los diseños aproximados de los bloqueos de las espumas de polietileno que serían válidos para las espumas de polietileno no reticuladas así como para las reticuladas, siguiendo las pautas de la metodología de los seis pasos, ver pag 71, figura 31.

Los bloqueos desarrollados, se han realizado teniendo en cuenta los cálculos siguientes:

- Fragilidad del producto: **60 (G´ s)**.
- Altura de caída a partir de la cual se ha realizado el diseño del bloqueo: **90 cm**.
- Las curvas de amortiguamiento obtenidas para este material.

#### **Sistema estudiado**

El sistema se subdivide en los siguientes subsistemas:

- Procesamiento de las materias primas para la fabricación de bloqueos de espuma de PE reticulada (ML-33).
- Transporte de las planchas de espuma de PE reticulada hasta el transformador: 100 km.
- Transformación de la plancha de espuma de PE reticulada en el bloqueo específico (mediante la operación de troquelado de la planchas, con un utillaje desarrollado en función del diseño del bloqueo o protección) para la protección del producto.
- Transporte del bloqueo de espuma de PE reticulada (ML-33) desde la empresa fabricante del embalaje hasta la empresa fabricante del producto, ambos dos ubicados en Hungría: 120 km.
- Transporte del televisor una vez embalado desde la empresa fabricante (Hungría) hasta el punto de venta (Valencia, España): 3.941 km.
- Transporte desde la superficie de distribución hasta el domicilio del consumidor: 30 km.

- Transporte desde el punto de recogida del bloque de espuma de PE reticulada, una vez convertido en residuo hasta el vertedero: 40 Km.
- Disposición final del bloque de PE reticulado, ML-33:
  - Vertedero: 100 %

A continuación se muestra el esquema del ciclo de vida del bloque de espuma de PE reticulada, ML – 33:

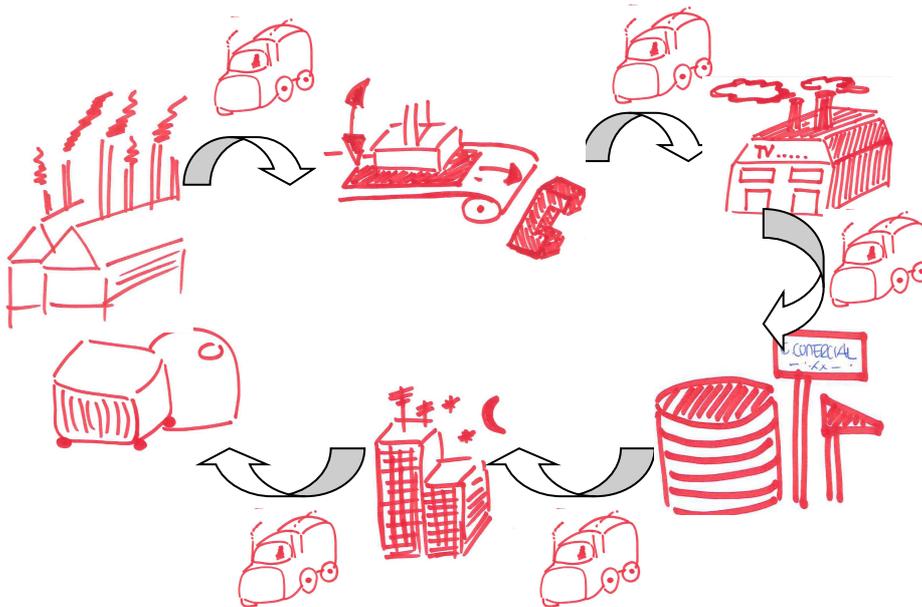


Fig. 41. Esquema del ciclo de vida del bloque de espuma de PE ML -33.

#### Límites del sistema estudiado,

1. Se ha considerado que el bloque de espuma de PE reticulada (ML-33), se ha fabricado en un 100 % de materia prima virgen (dato facilitado por su transformador: Modisprem).
2. No se considera el impacto medioambiental debido a la etapa de uso del bloque, por considerarse de bajo impacto.
3. No se consideran los envases y/o embalajes así como elementos auxiliares utilizados para hacer llegar los bloques de espuma de PE reticulada a la fábrica de televisores donde serán aplicados.
4. No se consideran los impactos del embalaje exterior del televisor, como podría ser la caja de cartón ondulado doble – doble (BC), la bandeja de cartón ondulado posicionadora, palets etc, por considerarse común para los tres ciclos de vida, Destacar que la caja de cartón ondulado con el bloque EPS es mayor frente a los de espuma de polietileno reticulada y sin reticular, ya que el bloque de EPS es de mayores dimensiones, No obstante se considera poco relevante, el impacto asociado

a la caja de cartón ondulado exterior, En este sentido, lo que realmente influye, es que de utilizar un bloqueo de EPS a uno de espuma de polietileno, se reduce el volumen total utilizado por tv, aumenta el número de televisores de 3 a 4 por paleta, disminuyendo el impacto medioambiental asociado a este transporte de distribución del producto.

### **Reglas de asignación de las cargas ambientales:**

En el caso de los datos obtenidos a partir de las bases de datos, las cargas ambientales han sido asignadas por los creadores de las bases de datos.

En el caso del impacto ambiental asociado a cada uno de los transportes contemplados en el sistema, la asignación de las cargas ambientales se ha realizado por peso.

### **Hipótesis planteadas:**

#### **1. Distribución de los bloques de espuma de polietileno reticulada, ML - 33 y del producto embalado:**

- La distribución del bloqueo de espuma de polietileno reticulada, ML - 33, se considera en el país fabricante del producto (tv de 42 pulgadas); Hungría, con una distancia media de 100 Km entre el fabricante de la plancha de espuma de PE reticulada al transformador (desarrollo de las dos tipologías de bloqueo necesarias para la protección de la tv).
- La distancia entre el transformador de las planchas de espuma de PE reticulada (ML-33), y el fabricante de tv, se ha considerado de 120 km.
- La distancia desde la fábrica del producto (Hungría) hasta que llega al punto de venta: Valencia, España, es de 3.941 km.
- Posteriormente, entre la superficie de distribución y el domicilio del consumidor, se considera una distancia de 30 km.
- En el caso del transporte de las planchas de espuma de PE (ML-33), se considera que van remontados y que se utilizan palets de 1.200 × 800 mm, con un altura de paletización de 1.200 mm, un total de 21 planchas por palet con unas dimensiones de 1.200 × 800 × 50 mm, por lo que el camión tiene una capacidad de 22 palets (11+ 11).
- Los bloques de las esquinas (4 unidades/tv) de espuma de polietileno, se suministran en plano y se considera que se necesita el doble de palets de este tipo de bloques, frente a los 2 bloques centrales necesarios por cada tv. Por lo que en un camión de 16 tn, se ha estimado que se necesitan 7 palets de bloques centrales y 14 palets de bloques para las esquinas.
- En el caso del transporte del producto, no se remontan los palets, por cuestiones de seguridad, por lo que sólo caben 11 palets.
- Se han seleccionado camiones de 16 tn. Los camiones van llenos, con los bloques de espuma de polietileno, así como en el caso del producto embalado y vacíos en los transportes de vuelta.

**2, Tratamiento de los residuos: bloqueos espuma PE reticulada, ML-33.**

Únicamente se considera como residuo del bloqueo de polietileno, que llega a los consumidores y es recogido por el camión de la basura, para destinarlo a vertedero, en su totalidad, Las espumas reticuladas como consecuencia del proceso de reticulación no se pueden reciclar, por lo que el residuo de estos bloqueos se destina totalmente a vertedero,

**3. Transporte 0, de la plancha de espuma de PE reticulada ML - 33, desde la empresa fabricante hasta el transformador (obtención de las dos tipologías de bloqueo desarrollados: esquineras y centrales),**

Consideramos la empresa fabricante de las planchas de espuma de PE reticulada ML - 33, se ubica en Hungría, al igual que la empresa transformadora, con un distancia entre ambas de 100 km.

Cálculo tnkm asociadas al transporte: Las planchas de espuma de PE (ML-33), tiene unas dimensiones de 1.200 × 800 mm, con una altura de 1.200 mm, con una densidad de 30 kg/m<sup>3</sup>, teniendo en cuenta que pueden ponerse 21 planchas por palet, En el camión se transportan los palets a dos alturas: 22 paletas /camión.

**4. Transporte 1, bloqueo de espuma de PE reticulada ML -33, desde la empresa fabricante del embalaje hasta la empresa fabricante del producto.**

Consideramos la empresa fabricante de los bloqueos de espuma de PE reticulada ubicada en Hungría, al igual que la empresa fabricante de televisores, con una distancia entre ambas de 120 km.

**5. Transporte 2, del televisor una vez embalado desde la empresa fabricante (Hungría) hasta la superficie de distribución (Valencia, España).**

La distancia considerada en este segundo transporte es de 3.941 km.

**6. Transporte 3, desde la superficie de distribución hasta el domicilio del consumidor.** La distancia considerada para este tercer transporte es de 30 km.

**7. Transporte 4, de los residuos.**

La distancia media considerada entre el punto de recogida del bloqueo de espuma de PE reticulada hasta el vertedero es de 40 km.

En los cinco transportes descritos el camión utilizado es de 16 Tn, el cual va lleno a la ida y vuelve vacío, Igualmente las distancias consideradas para cada uno de los transportes, son distancias medias.

## **Análisis del inventario**

El análisis de inventario comprende los siguientes procesos:

- **Procesamiento de las materias primas.**  
Se ha considerado el proceso de extracción de las materias primas, el proceso de transformación desde la granza a la espuma de polietileno reticulada (ML-33), considerando el proceso de troquelado para desarrollar los dos tipos de protecciones necesarias para la protección del televisor. Tanto los datos de la transformación de la granza en espuma de polietileno reticulada ML - 33, como el proceso de troquelado, necesario para la obtención de los dos tipos de bloqueo, se han obtenido a partir de las bases de datos del programa SimaPro 7,0,2 ó bien mediante aproximaciones (Polyethylene LDPE granulate at plant, Foaming expanding, Cutting roll f triples compound foils). El peso de los bloques de espuma de polietileno necesarios para la protección de una televisión es de 0,5511 Kg, Se ha considerado que la merma de granza para la obtención de la plancha de espuma de polietileno es despreciable.
- **Transporte de la plancha de espuma de polietileno ML - 33, desde la empresa fabricante hasta la empresa transformadora,**  
Consideramos que la empresa fabricante de las planchas de espuma de polietileno reticulada ML – 33, se encuentra en Hungría, al igual que la empresa transformadora para la obtención de los 2 tipos de bloques desarrollados, con una distancia entre ambas de 100 km.
- **Transporte del bloqueo de espuma de polietileno ML - 33, desde la empresa fabricante del embalaje hasta la empresa fabricante del producto.**  
Consideramos que la empresa fabricante del embalaje de espuma de polietileno reticulada ML – 33, se encuentra en Hungría, al igual que la empresa fabricante de televisores, con una distancia entre ambas de 120 Km.
- **Transporte del televisor una vez embalado desde la empresa fabricante (Hungría) hasta la superficie de distribución (Valencia, España),**  
La distancia considerada en este segundo transporte es de 3.941 km.
- **Transporte desde la superficie de distribución hasta el domicilio del consumidor,**  
La distancia considerada para este tercer transporte es de 30 km.
- **Transporte de los residuos,**  
La distancia media considerada entre el punto de recogida del bloqueo de espuma de polietileno reticulada ML - 33 y el vertedero, es de 40 km.

Estos cuatro transportes se realizan con un camión de 16tn de la base de datos Buwal 250.

- **Disposición final del bloqueo de espuma de polietileno reticulada, ML - 33 :**

Se han considerado los siguientes escenarios de disposición final:

- Vertedero: 100 %

Como consecuencia del proceso de reticulación de esta espuma, no es posible su reciclaje.

### **Resultados de la evaluación ambiental del bloqueo de ML-33:**

1. El transporte es la etapa de mayor impacto medioambiental en el ciclo de vida de este bloqueo de espuma de PE reticulada, aunque la aportación porcentual de esta etapa es menor en el caso de los bloqueos de espuma de PE en comparación con el bloqueo de EPS, como consecuencia del aumento del grado de optimización del espacio de carga del camión (de 3 a 4 tv/palet como consecuencia de la reducción de tamaño de los bloqueos de PE).
2. Las aportaciones de la etapa de obtención de este bloqueo es mayor en comparación con los otros dos, como consecuencia de que no se utiliza materia virgen reciclada para su fabricación.
3. Las aportaciones a la disposición final, son importantes dado que el residuo de este bloqueo no se recicla, como consecuencia del proceso de reticulación que se realiza para la obtención de esta espuma.

## **INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.**

### **Graficas de caracterización para la comparación de los tres materiales.**

Como consecuencia de la información introducida en el Inventario del ciclo de vida del bloqueo de EPS, de espuma de PE no reticulada Select Azul, y espuma de polietileno reticulada ML – 33, se obtienen los siguientes impactos agregados según el método Ecoindicator 99 en su versión individualista (I):

A continuación, se muestra la gráfica conjunta donde aparecen los tres ciclos de vida de los tres bloqueos de protección objeto de estudio:

**Gráfica de comparación de los valores relativos de caracterización de los impactos del ciclo de vida del bloque de poliestireno expandido, de espuma de polietileno reticulado (ML – 33) y de espuma de polietileno no reticulado (Select Azul, Etafoam®).**

En la siguiente gráfica se puede observar el impacto porcentual del ciclo de vida de los tres bloques objeto de estudio:

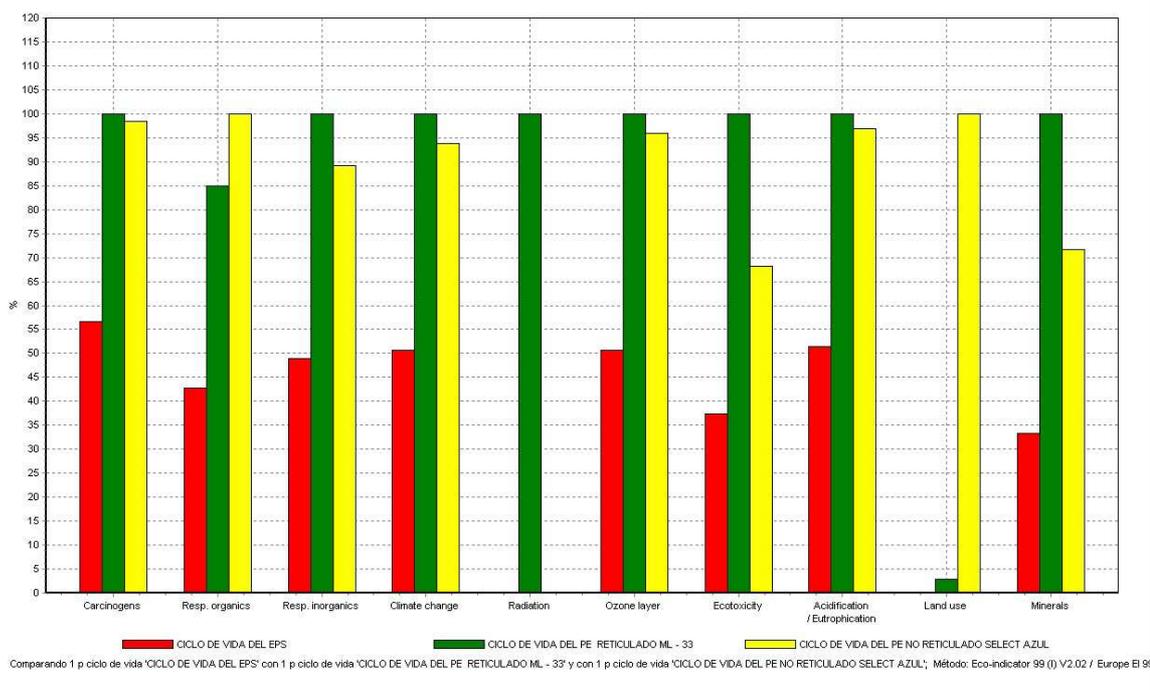


Fig 42. Gráfica comparación del ciclo de vida de los 3 bloques.

De la gráfica anterior se desprende que de los tres ciclos de vida que se comparan, el que presenta en general una mayor aportación porcentual para todas las categorías de impacto contempladas, es el ciclo de vida del bloque de espuma de polietileno reticulado (ML – 33). Las diferencias del comportamiento medioambiental de estos dos bloques de espuma de polietileno, radica en la imposibilidad de utilizar materia reciclada en las espumas de PE reticuladas ya que no puedan ser recicladas. Por este motivo se dispara la aportación porcentual de las espumas de polietileno reticuladas en cada una de las etapas de su ciclo de vida, para cada una de las categorías de impacto contempladas. Destacar la aportación del bloque de espuma de PE reticulada a la categoría de impacto; Radiación, como consecuencia de que se fabrica a partir de materia prima virgen al 100 %. El bloque que presenta un mejor comportamiento medioambiental, dado que su aportación porcentual a todas las categorías de impacto es menor en comparación con los otros dos bloques de espuma de polietileno (reticuladas y sin reticular) es el bloque de poliestireno expandido, como consecuencia del uso de un

porcentaje del 15 % de materia reciclada y al tener en cuenta un porcentaje de reciclado en su disposición final es de un 28 %.

### 5.2.3. Desarrollo de un modelo de costes para el bloqueo de material de amortiguamiento: criterio económico (C<sub>2</sub>).

El impacto económico asociado a cada una de las alternativas de diseño se calculó en base a las siguientes variables que conforman el modelo económico:

1. Coste para cada Protección en función del material:

$$X_1 = \text{peso de las protecciones diseñadas (kg)} \times \text{material (€)} \quad [3]$$

Tabla 11., Material de protección total considerado.

COSTE (Modisprem proveedor): X <sub>1</sub>	kg/m <sup>3</sup>	€/muestra 15×15×5 cm	Kg/muestra	€/kg	Kg/protección para 1 TV	€ /TV
EPS	10	0,362	0,011	32,17	0,5736	<b>18,45</b>
Ethafoam® select blue, non-cross – linked	29	0,521	0,033	15,97	0,5327 (0,10562 × 4 esquina protect + 0,0551 × 2 central protect)	<b>8,8</b>
ML - 33 cross - linked	30	0,898	0,034	26,61	0,5511 (0,10927 × 4 esquina protect + 0,0570 × 2 central protect)	<b>14,66</b>

2. Coste del transporte (0) de la espuma de PE en plancha hasta el transformador (100 km):

Únicamente en el caso de las espumas de polietileno (ML-33 y Select blue Etafoam®), es necesario considerar este transporte adicional, puesto que las planchas se producen y posteriormente se transforman en el bloqueo mediante troquelado, cabezales de corte, fresadoras entre otros. En el caso del bloqueo de poliestireno expandido, este se obtiene a partir de la granza mediante un molde directamente:

- ✓ 0,97 € / l gasoil
- ✓ Transport consumption; 30 l /100 km (ITENE)

$$X_2 = \frac{\text{dist (km)} \times \text{gasoil (€/l)} \times \text{gasoil consumo (l/km)}}{\text{n}^\circ \text{ TV embaladas / camión}} \quad [4]$$

Tabla 12 Costes transporte 0.

COSTE; X <sub>2</sub>	Protección	uds/palet	nº TV embaladas / pallet	nº TV embaladas /camión	€ /TV
PE protecciones	Esquina protección (4 uds)	294	73	1,022	0,0284
	Central protección (2 uds)	336	168		

### 3. Coste de producción de los bloqueos de protección:

#### 3.1. Coste asociado al molde del poliestireno expandido (EPS)

Para la obtención de los bloqueos de EPS, es necesario fabricar un molde específico en función del diseño del bloqueo:

- ✓ Coste del molde:
  - ✓ Inversión inicial: 3.000 €/EPS molde,
  - ✓ Considerando una velocidad de producción de 30 unidades/min, durante 1 año, el coste real asociado por unidad es de **0,0178 €/EPS bloqueo**,
- ✓ Coste de la energía del proceso: **0,0533 €/EPS bloqueo**,
  - ✓ EPS maquina con el molde: 17 kw/h, ([www.epsmachine.es](http://www.epsmachine.es)),
  - ✓ Media del proceso de obtención del bloqueo mediante el molde: 51-52 protecciones / h
  - ✓ kwh= 0,16 € (*Iberdrola*).

#### 3.2. Coste asociado a la producción de las dos espumas de polietileno (ML -33 y Select Blue Etafoam®)

Las planchas de espuma de polietileno se transforman en los dos tipos de protecciones diseñadas (centrales y de esquina), utilizando un cabezal de corte,

- ✓ Coste de los dos utilajes necesarios para las protecciones de esquina y central: 2 herramientas diferentes: 110 € / herramienta), Inversión inicial: **0,002 € / PE bloqueo**,
- ✓ Coste de la energía del cabezal de corte: **0,0798 € / PE bloqueo**
  - ✓ Consumo del cabezal de corte: 11,2 kw / h, ([www.epsmachine.es](http://www.epsmachine.es)),
  - ✓ Media:22 protecciones/h
  - ✓ kwh= 0,16 € (*Iberdrola*),

Se consideró que el proceso de transformación de las planchas de polietileno era el mismo aunque fueran dos materiales distintos, puesto que el diseño era igual, cambia el peso:

$$X_3 = inversión\ inicial + energia\ (\text{€})/TVset \quad [5]$$

Tabla 13. Costes, de fabricación.

COSTE; X <sub>3</sub>	Protección	Inversión inicial	Coste energético	€ /TV
<b>EPS protecciones</b>	Esquina protección (4 uds)	0,0178	0,0533	<b>0,071</b>
<b>PE protecciones</b>	Esquina protección (4 uds)	0,002	0,0798	<b>0,0818</b>
	Central protección (2 uds)			

4. Coste del transporte 1 (120 km) desde la empresa fabricante de las protecciones hasta la empresa fabricante del producto (televisores).

$$X_4 = \frac{\text{dist (km)} \times \text{gasoil (€/l)} \times \text{gasoil consumption (l/km)}}{\text{nº TV embaladas / camión}} \quad [6]$$

Tabla 14. Costes transporte 1.

COSTE; X <sub>4</sub>	Protección	uds/pallet	nº TV embaladas /pallet	nº TV embaladas/camión	€/TV
<b>EPS protecciones</b>	Esquina protección (4 uds)	55	<b>13</b>	286	<b>0,122</b>
<b>PE protecciones</b>	Esquina protección (4 uds)	294	<b>73</b>	1,022	<b>0,034</b>
	Central protección (2 uds)	336	168		

5. Coste asociado al almacenamiento de las protecciones en el fabricante de televisores,  
 Dos palets de protecciones de PE son necesarios; 1 de protecciones centrales y otro de protecciones de esquina para poder embalar un total de 73 televisiones,  
 Teniendo en cuenta el espacio necesario para poder almacenar los dos pallets para los dos tipos de material / diseño:

- ✓ 1120 m<sup>2</sup> (1000 €/mes)
- ✓ 1200 × 800 × 2 = 1,92 m<sup>2</sup>

$$X_5 = \frac{\text{alquiler mensual (€)}}{\text{nº TV embaladas con 2 pallet de protecciones}} \quad [7]$$

Tabla 15. Costes de almacenamiento asociados.

COSTE; X <sub>5</sub>	Protección	uds/pallet	nº TV embaladas/2 pallet	€/TV (mes)
<b>EPS protecciones</b>	Esquina protección (4 uds)	55	26	0,06593
	Esquina protección (4 uds)	294	73	0,02348
<b>PE protecciones</b>	Central protección (2 uds)	336	168	

6. Coste asociado al transporte 2 (3,941 km) de la televisión de 42 pulgadas:  
 Considerando 11 palets por camión, dado que por cuestiones de protección del producto no se remontan las cargas paletizadas, el resultado es:

$$X_6 = \frac{\text{distancia (km)} \times \text{gasoil coste (€/l)} \times \text{gasoil consumo (l/km)}}{\text{nº TV embaladas / camión}} \quad [8]$$

Tabla 16. Costes asociados a la TV embalada.

COSTE; X <sub>6</sub>	uds/pallet	nº TV embaladas/camión	€/TV
<b>EPS protecciones</b>	3	33	<b>34,75</b>
<b>PE protecciones</b>	4	44	<b>26,06</b>

El modelo de costes final;

$$\checkmark \text{ Ecuación de costes, (€) = } X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 \quad [9]$$

A modo resumen se adjuntan los resultados para cada variable económica y material en la siguiente tabla 17 :

Tabla 17. Costes asociados a cada diseño de protección:

Variables	EPS	Select Blue Etafoam®	ML -33®
<b>X<sub>1</sub></b>	18,45	8,8	14,66
<b>X<sub>2</sub></b>	0	0,028	0,028
<b>X<sub>3</sub></b>	0,071	0,082	0,082
<b>X<sub>4</sub></b>	0,122	0,034	0,034
<b>X<sub>5</sub></b>	0,0659	0,023	0,023
<b>X<sub>6</sub></b>	34,75	26,06	26,06
<b>Coste TOTAL</b>	<b>53,46</b>	<b>35,03</b>	<b>40,88</b>

#### **5.2.4. Análisis comparativo de las alternativas de bloqueo de material de amortiguamiento en base a los resultados de los dos criterios de selección estudiados.**

Este análisis comparativo de las diferentes alternativas de diseño, se realiza a partir de los cálculos realizados a lo largo de toda la investigación correspondiente al experimento 2, para cada uno de los criterios de selección considerados; el medioambiental ( $C_1$ ) y el económico ( $C_2$ ). Finalmente se decide realizar un análisis comparativo mediante la técnica multicriterio de la suma ponderada, donde el peso de los dos criterios es del 50 %, ya que tras realizar entrevistas con expertos, dependiendo de su ámbito de trabajo más relacionado con la sostenibilidad ambiental o más bien empresarial, los resultados eran muy diferentes, siendo imposible llegar a un consenso. En función de las preferencias del selector, se podría dar más peso a una de los dos criterios, al coste o al impacto ambiental. Por ello se realiza, en el experimento 2, un análisis de sensibilidad.

Para poder realizar una comparación global de las alternativas de diseño, se han normalizado los datos para cada criterio  $C_1$  y  $C_2$ . Finalmente el sumatorio de las dos variables para cada solución de protección, es el resultado final.

Destacar que las dos variables contempladas en el análisis comparativo son más positivas cuanto menor es su valor. Por lo tanto dado que les hemos dado el mismo peso tanto a la variable económica como a la variable ambiental, el diseño con el menor valor resultante del sumatorio de los dos es el que se debe de seleccionar.

Destacar que la metodología se compone de una serie de herramientas que permiten realizar los cálculos para cada uno de los criterios de selección considerados, además de proponer como paso inicial, el método de los seis pasos para poder diseñar a partir de un material (curvas de amortiguamiento), la protección justa y necesaria para proteger a un producto frente a un entorno de distribución particular.

#### **$C_1$ : Impacto medioambiental, Contribución de cada a cada una de las categorías de impacto (Ecoindicator 99 I/I) a lo largo del ciclo de vida de las protecciones,**

El objetivo de este criterio es alcanzar el mínimo impacto medioambiental total asociado a cada una de las etapas del ciclo de vida del bloqueo de protección considerado. En la siguiente tabla se muestran los resultados normalizados de este criterio  $C_1$  para cada una de las alternativas de diseño / materiales.

Tabla 18. Resultados criterio 1.

Categoría de impacto	Unidad	EPS LCA	ML - 33 LCA	Etafoam® LCA	EPS valores*	ML – 33 valores*	Etafoam® valores*
Carcinogens	DALY	0,000000109	0,000000193	0,000000189	0,56	1,00	0,98
Resp, organics	DALY	0,00000017	0,000000339	0,000000399	0,43	0,85	1,00
Resp, inorganics	DALY	0,00000303	0,00000619	0,00000552	0,49	1,00	0,89
Climate change	DALY	0,00000482	0,00000953	0,00000894	0,51	1,00	0,94
Radiation	DALY	3,53E-13	1,69E-10	3,58E-13	0,00	1,00	0,00
Ozone layer	DALY	0,000000016	3,16E-08	3,03E-08	0,51	1,00	0,96
Ecotoxicity	PDF*m2yr	0,0194	0,0519	0,0354	0,37	1,00	0,68
Acidification/ Eutrophication	PDF*m2yr	2,31	4,,48	4,35	0,52	1,00	0,97
Land use	PDF*m2yr	0,00000468	0,000528	0,0182	0,00	0,03	1,00
Minerals	MJ surplus	0,000133	0,0004	0,000287	0,33	1,00	0,72
Land use	PDF*m2yr	0,00000468	0,000528	0,0182	0,00	0,03	1,00
Acidification/ Eutrophication	PDF*m2yr	2,31	4,48	4,35	0,52	1,00	0,97
Ecotoxicity	PDF*m2yr	0,0194	0,0519	0,0354	0,37	1,00	0,68
Ozone layer	DALY	0,000000016	3,16E-08	3,03E-08	0,51	1,00	0,96
Radiation	DALY	3,53E-13	1,69E-10	3,58E-13	0,00	1,00	0,00
Climate change	DALY	0,00000482	0,00000953	0,00000894	0,51	1,00	0,94
Resp, inorganics	DALY	0,00000303	0,00000619	0,00000552	0,49	1,00	0,89
Resp, organics	DALY	0,00000017	0,000000339	0,000000399	0,43	0,85	1,00
<b>CONCLUSION C<sub>1</sub> (resultados normalizados)</b>					<b>6,54</b>	<b>15,76</b>	<b>14,58</b>

\*Valores normalizados

## C<sub>2</sub>: Impacto económico: €

El objetivo de este segundo criterio C<sub>2</sub>, es la minimización del coste asociado a cada una de las etapas del ciclo de vida del bloqueado considerado: Materias primas, producción, transporte, almacenamiento, etc.

Tabla 19. Resultados criterio 2.

<b>COSTE</b>		<b>EPS</b>	<b>Select Blue Etafoam®</b>	<b>ML -33®</b>
X <sub>1</sub>	Coste de las protecciones en función del material,	18,45	8,8	14,66
X <sub>2</sub>	Transporte (100 km) de las planchas de PE a la planta de transformación,	0	0,028	0,028
X <sub>3</sub>	Coste de fabricación: ✓ Coste del EPS molde (inversión inicial), ✓ Coste del troquelado PE espumas (inversión inicial),	0,071	0,082	0,082
X <sub>4</sub>	Coste del transporte (20 km) coste desde el fabricante del embalaje hasta el fabricante de televisores,	0,122	0,034	0,034
X <sub>5</sub>	Coste de almacenamientos asociados a las protecciones de la TV,	0,0659	0,023	0,023
X <sub>6</sub>	Costes asociados al transporte (3,941 km) de la TV,	34,75	26,06	26,06
<b>TOTAL</b>		<b>53,46</b>	<b>35,03</b>	<b>40,88</b>
<b>Valores normalizados</b>		<b>1</b>	<b>0,65</b>	<b>0,76</b>

Los resultados muestran que el diseño de EPS es la mejor opción contemplando de una forma global el C<sub>1</sub> y el C<sub>2</sub>. No obstante dependiendo de las prioridades del diseñador o de la persona que ha de tomar la decisión, se podría atribuir un peso diferente a uno de los dos criterios que conforman la metodología. Por este motivo se realiza un análisis de sensibilidad con diferentes pesos para estos dos criterios C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub>.

De este ejemplo práctico se observa, como el mejor comportamiento ambiental del diseño de EPS compensa su coste, que es mayor frente a los bloqueos de PE, no obstante estos últimos presentan un mayor impacto ambiental por lo que en la suma global de los dos criterios para cada alternativa, dándoles el mismo peso (50 %), el bloqueo de EPS es el más óptimo.

En la siguiente tabla se muestra el cómputo total de los dos criterios para cada una de las alternativas de diseño:

Tabla 20. Resultado de la suma de los dos criterios para cada una de las alternativas.

CRITERIA	OBJECTIVE	EPS	Etafoam®	ML – 33
<b>C<sub>1</sub>: Impacto Medioambiental,</b>	El mínimo impacto ambiental producido por el bloqueo de protección en sus etapas del ciclo de vida; extracción, fabricación, transporte y disposición final,	0,415	0,925	1
<b>C<sub>2</sub>: Impacto Económico,</b>	El mínimo coste asociado a las diferentes etapas del ciclo de vida del bloque: Materias primas, transporte, fabricación, disposición final,	1	0,65	0,76
<b>TOTAL (C<sub>1</sub> + C<sub>2</sub>) con un peso del 50 % cada criterio</b>		<b>0,7075</b>	<b>0,7875</b>	<b>0,88</b>

El caso de estudio descrito en este segundo experimento, valida la viabilidad de la metodología desarrollada para seleccionar un diseño de protección optimizado.

Considerando diferentes requerimientos como la mínima cantidad de embalaje para proteger a un producto, el mejor comportamiento medioambiental, y el mínimo coste asociado, Las conclusiones que se desprenden son:

- ✓ El comportamiento mecánico del material Etafoam® es muy similar al del material ML -33, ambos son espumas de polietileno y son mejores frente al EPS, Por esta razón se necesita menor cantidad de material en el diseño de los bloqueos de las espumas de PE, mejorando la optimización del espacio de carga y por tanto reduciendo el coste asociado al transporte.
  - ✓ Etafoam® (8,8 €/TV) es más económico que las otras dos protecciones: EPS (18,45 €/TV ) y ML-33 (14,66 €/TV).
  - ✓ Las espumas de polietileno reducen el coste económico en general debido a la mejora de la optimización del espacio de carga durante el transporte, dado que se aumenta en una unidad el número de televisores embalados por pallet durante el transporte desde el fabricante del producto hasta el punto de venta, uno de los transportes más largos (3,941 km).
- ✓ Por otro lado el comportamiento medioambiental del EPS, del diseño resultante es mejor que el de las espumas de PE debido a los siguientes aspectos:
  - ✓ Cantidad de material reciclado utilizado en el proceso de producción: 15 %.

- ✓ En la disposición final del EPS, un porcentaje del 28 % se recicla.
- ✓ El comportamiento medioambiental de las espumas de PE es peor debido a:
  - ✓ ML-33, espuma de polietileno de célula cerrada, no usa materia reciclada en su proceso de fabricación.
  - ✓ Select blue Etafoam® espuma de célula cerrada no reticulada, utiliza un porcentaje de materia reciclada de un 10 % en su proceso de fabricación, pero sigue siendo inferior al utilizado en la fabricación del EPS (15 %).
  - ✓ En general las espumas de polietileno son menos recicladas en su disposición final (8 %), que las protecciones de EPS (28%).
  - ✓ Las espumas de PE tienen un transporte adicional asociado (transporte 0: 100 km), desde el fabricante de la espuma que la expide en planchas hasta la empresa encargada de su transformación en base al diseño de protección considerado, mediante cabezales de corte, fresadoras etc.; En el caso de las protecciones de EPS, la granza a través del molde desarrollado en función del diseño origina la protección.
  - ✓ El coste del proceso de producción de los bloques de EPS necesarios para la protección de una tele es menor que en el caso de los bloques de espuma de polietileno, debido a que el número de protecciones necesarias es menor.

## 6. DISCUSION Y CONCLUSIONES

En el presente capítulo se pretenden contrastar las hipótesis principales y las hipótesis de trabajo, planteadas en las investigaciones propuestas en la presente tesis, con los resultados de las investigaciones llevadas a cabo, con el fin de poder discutir y delimitar su alcance.

### H.P. 1. Elevada fiabilidad de las curvas de amortiguamiento desarrolladas por lo métodos abreviados frente al estándar, recopilado en la norma ASTM D1596:

- ✓ Los dos métodos simplificados estudiados como alternativa al método estándar ASTM D1596, son viables para la obtención de las curvas de amortiguamiento de los materiales de célula cerrada, como consecuencia del bajo error, obtenido tras la comparativa de los resultados de los dos métodos abreviados frente a los resultados del método estándar. Los errores medios y máximos en ambos métodos, para los dos materiales considerados teniendo en cuenta 6 cargas estáticas y alturas de caída de hasta 76,2 cm, son 12 % y 7% (ver tablas 5 y 7).
- ✓ Las curvas de amortiguamiento obtenidas mediante el método de Sek, en el que se asume el factor dinámico de velocidad igual a la unidad como consecuencia de la velocidad del ensayo de compresión (0,425 m/s), hasta alturas de caída de 76,2 cm, para los dos materiales de amortiguamiento considerados, son equivalentes a las curvas de amortiguamiento obtenidas para estos dos materiales mediante el método estándar recopilado en la norma ASTM D1596.

### H.P. 2. Los tiempos necesarios para la obtención de las curvas de amortiguamiento de un material de embalaje, siguiendo el método de la norma estándar ASTM D1596, se pueden reducir considerablemente, mediante el uso de métodos simplificados como el método de Sek y método de Burgess. Al reducirse los tiempos se reducen costes y aumenta la reproducibilidad de los resultados.

Como se expone a continuación, esta hipótesis ha sido corroborada mediante las siguientes experiencias:

#### ASTM D1596

- ✓ En el método ASTM D1596, se necesita un gran número de datos para poder construir las curvas de amortiguamiento de un material, por lo que se traduce en tiempo y un coste importante como consecuencia del número de muestras que se necesita. Así por ejemplo en la investigación descrita, para 7 alturas de caída, 6 cargas estáticas y dos materiales de amortiguamiento, considerando únicamente 1 espesor, fueron necesarios 84 impactos. Considerando que los ensayos se realizaron de forma eficiente, unos 220 minutos fueron necesarios para poder obtener 7 curvas de amortiguamiento, con únicamente 6 puntos para cada material.

- ✓ En el caso de que fuera necesario obtener nuevas curvas de amortiguamiento del mismo material, o aumentar el rango de cargas estáticas consideradas, sería necesario realizar nuevos ensayos, con el coste y tiempo que supone.

#### **Método de Michael Sek,**

- ✓ Mediante este método se obtienen las curvas de amortiguamiento de un material, utilizando menos tiempo y un menor número de muestras. Únicamente es necesario realizar un ensayo de compresión a alta velocidad, para obtener las curvas de amortiguamiento de un material. Así por ejemplo en el caso de la tesis realizada, en tan sólo 4 minutos se obtienen los datos necesarios para poder ser programados mediante una aplicación de MATLAB® y obtener las curvas de amortiguamiento. Considerando que con 10 minutos es suficiente para poder llevar a cabo dicha programación, se concluye que con 14 minutos, se desarrollarían 7 curvas de amortiguamiento.
- ✓ En el caso de que se tengan que obtener nuevas curvas de amortiguamiento del material, no es necesario realizar más ensayos, se pueden desarrollar a partir del ensayo de compresión a alta velocidad realizado al material de amortiguamiento.

#### **Stress – Energy method (dynamic stress versus dynamic energy) by Gary Burgess**

- ✓ Mediante este método igualmente se consigue reducir el número de muestras necesarias así como los tiempos de ensayo, únicamente se necesitan 8 caídas para obtener las curvas de amortiguamiento de un material con alto grado de equivalencia con las obtenidas siguiendo el método de la ASTM D1596. Así por ejemplo en la presente investigación, únicamente han sido necesarios 42 minutos para poder obtener los parámetros que serán programados mediante una aplicación de MATLAB®, para obtener las curvas. Considerando 10 minutos para poder realizar la programación de los datos recopilados, con un total de 52 minutos, se tendrán las curvas de amortiguamiento para cada uno de los materiales considerados.
- ✓ Destacar que este método se basa en los ensayos que se realizan siguiendo la norma ASTM D1596, pero únicamente se necesitan 8 ensayos.
- ✓ Si es necesario desarrollar nuevas curvas de amortiguamiento para los materiales estudiados, no es necesario realizar más ensayos.

**HP 3.** La fiabilidad del método desarrollado por Burgess, frente al método de M Sek y a la norma ASTM D 1596, depende de las características del material de amortiguamiento en función de los cuales se ajusta en mayor o menor medida el modelo exponencial propuesto por el autor (Burgess).

H.T. 3.1. Los métodos simplificados no presentan el mismo grado de idoneidad para todos los materiales de amortiguamiento, dependiendo de la naturaleza del material se adaptará o ajustará con mayor fiabilidad a uno de los dos métodos; Método de M, Sek y el Método de Burgess.

- ✓ El uso del método de Burgess está limitado para ciertos tipos de materiales de amortiguamiento, comúnmente denominados de célula cerrada, puesto que sus propiedades de amortiguamiento residen en el desplazamiento del aire interior que se encuentra en sus células. Por ello este método es factible para el EPS y PE - Etafoam®, puesto que son materiales de célula cerrada, sin embargo los resultados son mejores en el primer caso, se produce un mejor ajuste al modelo propuesto por el autor.

H.T. 3.2. El porcentaje de error máximo y medio del método de Burgess, depende del número de puntos seleccionados para realizar el ajuste de la curva y de la distancia existente entre los puntos seleccionados.

- ✓ Mediante este método es posible obtener las curvas de amortiguamiento con un error relativamente bajo, con sólo 2 puntos con una tensión dinámica muy diferente, dado que en este modelo el porcentaje de error depende del número de puntos y de su proximidad.
- ✓ Igualmente se ha de considerar que el ajuste de la ecuación siguiendo el método de Burgess, se ha realizado utilizando un elevado número de puntos  $n=41$  (PE) y  $n=42$  (EPS), lo cual significa que esta circunstancia es la que menos error tendría, ya que al disminuir el número de puntos y aumentar su proximidad, aumenta el error de este método tal y como se ha descrito anteriormente (Fig 22 y Fig 23).

**H.P. 4.** Las propiedades de amortiguamiento de un material de embalaje se pueden obtener a partir de sus características de compresión, tal y como se describe en el método desarrollado por Michael Sek.

H.T. 4.1. Si la velocidad del ensayo de compresión de un material de amortiguamiento es como mínimo el 11 % de la velocidad esperada desde una altura de caída dada, el factor dinámico de la velocidad que corrige los efectos dinámicos, puede asumirse cercano a la unidad, evitando su cálculo mediante un algoritmo de mínimos cuadrados.

- ✓ El mayor inconveniente del método de M, Sek, está en la necesidad de determinar un factor dinámico mediante un algoritmo de mínimos cuadrados para poder corregir los efectos dinámicos de la velocidad del ensayo de compresión y poder determinar la aceleración máxima de un impacto. Para no tener que calcular este factor, la velocidad del ensayo de compresión, ha de ser elevada, para poder considerar el factor, de velocidad próximo a 1. En esta tesis se ha comprobado que con una velocidad de 0,425 m/s, se consigue una buena estimación de las curvas de amortiguamiento hasta alturas de 76,2 cm, puesto que esta velocidad de ensayo, representa el 11 % de la velocidad esperada desde un impacto desde una altura de 76,2 cm. En el caso de alturas de caída superiores se ha de aumentar la velocidad del ensayo de compresión o bien calcular el factor dinámico de velocidad, mediante el algoritmo de mínimos cuadrados.

**H.P.5.** La reproducibilidad del método de Sek es mayor que la del método de Burgess y esta a su vez superior al método estándar recopilado en la norma ASTM D1596.

- ✓ El método de la norma ASTM D1596, presenta una menor reproducibilidad, frente a los otros dos métodos abreviados explicados anteriormente, en los que el número de muestras necesarias para obtener las curvas de amortiguamiento de un material es menor. Además los datos obtenidos están influenciados por el filtro seleccionado en el análisis y por el error humano.
- ✓ El método de Sek presenta por todo ello una elevada reproducibilidad frente al método de Burgess y el estándar, al simplificarse el proceso de ensayo y tener menos dependencia del error humano. Por lo que se considera que el método de Sek, es la mejor alternativa al método estándar para la obtención de las curvas de amortiguamiento de un material. Destacar la importancia de la velocidad en el ensayo de compresión del método puesto que ha de ser el 11% de la velocidad de la caída desde la altura considerada en el ensayo, para poder estimar el factor dinámico de la velocidad próximo a la unidad y simplificar el método.
- ✓ El método de Burgess, pese a utilizar datos obtenidos según el procedimiento recopilado en el método estándar, se necesita un número reducido de datos del ensayo, por lo que la reproducibilidad es mayor que el método recopilado en la ASTM D 1596.

**H.P. 6.** El material de amortiguamiento óptimo a seleccionar para la protección de un producto frente a los riesgos derivados de su ciclo de distribución, una vez se diseñe para proteger al producto (propiedades de amortiguamiento; cushion curves), dependerá del criterio de costes (coste de la materia prima, del proceso de transformación, de los transporte asociados etc), y del criterio medioambiental (impactos medioambientales derivados de cada una de las etapas del ciclo de vida del producto).

La selección de un diseño de embalaje se basa en una gran variedad de factores como el coste, las propiedades mecánicas (resistencia mecánica, amortiguamiento etc), aspectos medioambientales etc. La investigación que se recopila en este segundo experimento, ha desarrollado una metodología para la selección del embalaje de protección óptimo en la que se introducen los requerimientos de protección a tener en cuenta para un diseño de embalaje funcional y se selecciona el embalaje óptimo en base a criterios económicos ( $C_2$ ) y medioambientales ( $C_1$ ).

A continuación se resume en la siguiente tabla la definición de los dos criterios de selección del bloque óptimo, partiendo de las alternativas que han sido diseñadas para ser funcionales, conociendo los riesgos del ciclo de distribución del producto así como las prestaciones físico – mecánicas de cada material considerado.

Tabla 21. Procedimiento para estimar los dos criterios medioambiental y económico.

CRITERIO	INDICADOR	COMO ESTIMAR EL INDICADOR	
<b>C1: Impacto medioambiental</b>	<b>DALY, Disability Adjusted Life Years;</b> <b>PDF, Potentially Disappeared Fraction:</b> El mínimo impacto ambiental generado por el bloqueo en sus etapas de vida; Materias primas, fabricación, transporte, disposición final etc,	LCA (Life Cycle Assessment: software SimaPro 7,0,2, PRÉ Consultants),	
<b>C2: Impacto económico</b>	<b>€:</b> El mínimo coste asociado a cada una de las etapas del ciclo de vida del bloqueo: Materias primas, fabricación , transporte, disposición final etc,	Optimización del espacio de carga (software; Multipack – Multimix etc,)	Consulta del precio: <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Material de embalaje</li> <li>✓ Gasoil</li> <li>✓ Maquinaria Kw/h</li> <li>✓ €/kwh</li> <li>✓ €/moldes o aparatos etc,</li> </ul>

H.T. 6.1. Los bloqueos de material de amortiguamiento con mejoras en su comportamiento medioambiental, no siempre van en paralelo con reducciones en el coste.

Los resultados del caso de estudio demuestran que la protección de EPS tienen un mejor comportamiento medioambiental (0,415) que la espuma Etafoam® (0,925), Por otro lado la protección de EPS es más cara que la protección Etafoam®, Por lo que no siempre los que presentan ventajas a nivel medioambiental resultan más económicos.

H.T. 6.2. Actualmente es difícil de encontrar una alternativa al poliestireno expandido (EPS) como consecuencia de las propiedades de amortiguamiento del (EPS), teniendo en cuenta que es uno de los materiales más económicos, de ahí su gran uso como material de protección y amortiguamiento.

El caso de estudio, ha revelado que el EPS no es más económico frente a los diseños de espumas de PE, considerando todas las variables que conforman el modelo económico desarrollado a medida para esta metodología de selección. Existe una serie de variables económicas asociadas al diseño de forma directa e indirecta que penalizan o favorecen al coste que finalmente tiene un diseño de protección específico.

H.T. 6.3. El poliestireno expandido dada su difícil recogida una vez que se convierte en residuo, presenta impactos negativos en su etapa de disposición final, pese a que en los últimos tiempos se han puesto en marcha operaciones para su reciclado, entre ellas la

valorización energética, su introducción como materia secundaria en nuevos procesos de fabricación etc.

Del caso de validación realizado pese a que los porcentajes de materia reciclada utilizada para la producción (15 %), así como los porcentajes de EPS que se reciclan en la disposición final, no son muy elevados (28 %), son mayores en comparación con las espumas de PE, lo que repercute en un mejor comportamiento medioambiental del EPS. Destacar que en el caso de las espumas de PE de célula cerrada (ML-33) no se utiliza materia reciclada en su proceso de producción, ni se puede reciclar una vez termine su ciclo de vida.

#### **H.P 7. Dependencia del modelo de costes, del diseño del material de amortiguamiento,**

H.T 7.1. El coste de un bloque de material amortiguante depende no sólo del precio de la materia prima y del proceso utilizado para su fabricación, sino también de una serie de costes que dependen de forma indirecta del diseño optimizado del material: grado de optimización del espacio de carga en el transporte y en el almacén, etc.

El impacto económico de los bloqueos estudiados fue estimado considerando las principales fases del ciclo de su ciclo de vida, La ecuación resultante, desarrollada para esta metodología de selección, tenía en cuenta costes de materias prima, producción, transporte, almacenamiento etc. La optimización del espacio de carga durante el transporte depende de las dimensiones de las protecciones diseñadas que a su vez dependen de las características del material de amortiguamiento. Este aspecto es importante dado que el transporte es una de las fases del ciclo de vida de un producto que mayor impacto medioambiental tiene asociado. Por otro lado al optimizar el espacio de carga se reducen los costes asociados al transporte y muy probablemente el coste asociado al embalaje ya que la cantidad de material que se necesita para proteger una misma carga, se reduce (depende del precio del material; hay materiales que permiten reducir cantidad pero tienen un elevado precio...). Igualmente se disminuye también el coste asociado a la gestión del residuo del embalaje una vez finalizada su función.

#### **H. P.8. El peso de los criterios de selección considerados al aplicar la metodología, modifica el resultado en función de los porcentajes considerados.**

Es decir, en el caso práctico, dado que se le da la misma importancia o peso a los dos criterios el económico y el medioambiental, al final en los cálculos realizados para cada criterio y alternativa de diseño, se obtiene una puntuación global de las tres alternativas consideradas, donde se puede observar que los dos criterios de selección son de signo contrario, es decir el EPS tiene el mejor comportamiento medioambiental sin embargo es de los bloqueos más caros. Al tener el mismo peso los criterios, se contrarrestan las puntuaciones individuales de cada criterio para ese material /bloqueo. Si el decisor diera más peso al criterio económico, seguramente no hubiera seleccionado este bloqueo y la puntuación final de cada alternativa de protección hubiera sido diferente. Por ese motivo se

ha hecho un análisis de sensibilidad, en donde los criterios cambian su peso, tal y como se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 22. Resultados del análisis de sensibilidad.

Criterio   Alternativas	Peso	EPS	ML - 33	ETAFOAM
C1	50	29,8%	37,1%	33,2%
C2	50			
C1	75	23,8%	39,9%	36,3%
C2	25			
C1	67	25,7%	39,0%	35,3%
C2	33			
C1	80	22,6%	40,4%	37,0%
C2	20			
C1	25	35,7%	34,3%	30,0%
C2	75			
C1	33	33,8%	35,2%	31,0%
C2	67			
C1	20	36,9%	33,7%	29,4%
C2	80			

De la tabla anterior se desprende que el EPS es la mejor opción siempre que el criterio medioambiental tenga un peso comprendido ente 50-80%, es decir cuando el decisor tiene una concienciación ambiental importante, quedando en un lugar intermedio el Etafoam y por último el ML -33 como la peor opción. No obstante en el momento que el peso del criterio medioambiental se reduce ( $C_1$ ), entre el 20 -33 %, la mejor opción es el Etafoam, siendo en estos casos donde el criterio económico tiene más peso, el EPS es la peor opción, salvo cuando el criterio medioambiental tiene un peso del 33 %, la peor opción es el ML – 33, quedando en segundo lugar el EPS.

Tabla 23. Clasificación de los tres materiales en función del análisis de sensibilidad.

Criterio   Alternativas	Peso	EPS	ML - 33	ETAFOAM
C1	<b>50</b>	1	3	2
C2	50			
C1	<b>75</b>	1	3	2
C2	25			
C1	<b>67</b>	1	3	2
C2	33			
C1	<b>80</b>	1	3	2
C2	20			
C1	<b>25</b>	3	2	1
C2	75			
C1	<b>33</b>	2	3	1
C2	67			
C1	<b>20</b>	3	2	1
C2	80			

**Por tanto en base a lo expuesto en este apartado, se concluye que se han alcanzado los objetivos planteados en la tesis en mayor o menor medida.**

## **7. FUTURAS INVESTIGACIONES:**

Como consecuencia de los resultados y conclusiones resultantes de los dos experimentos que componen esta tesis, se considera relevante el plantear las siguientes investigaciones, como próximos pasos a seguir para poder terminar de validar algunas de las hipótesis de la tesis:

- ✓ Mejorar los resultados obtenidos, aumentando la velocidad del ensayo, en el método de M, Sek de compresión con el fin de completar las curvas de amortiguamiento para alturas de caída superiores a los 76,2 cm, sin tener que calcular el factor dinámico de velocidad.
- ✓ Estudiar la influencia de la velocidad de compresión sobre los datos obtenidos para la representación de las curvas de amortiguamiento de un material, en próximas investigaciones, en el método de M. Sek.
- ✓ Caracterizar las propiedades de amortiguamiento de diferentes materiales (curvas de amortiguamiento), aplicando los diferentes métodos estudiados en función del comportamiento de los posibles materiales a comparar:
  - ✓ Materiales de amortiguamiento derivados del plástico de célula abierta,: las características de los materiales de amortiguamiento, no solo dependen del espesor y de la densidad del material sino también de su estructura interna, es decir espumas de célula abierta, de célula cerrada y en este último caso de célula reticulada o sin reticular. Los materiales de célula abierta presentan peores propiedades de amortiguamiento que los materiales de célula cerrada, no obstante se han de caracterizar.
  - ✓ Materiales de amortiguamiento derivados del papel y el cartón ondulado.
  - ✓ Desarrollar nuevos métodos de caracterización para materiales nuevos, los cuales se comportan de forma diferente: materiales desarrollados a partir de biopolímero etc.
- ✓ Estudiar en detalle los diferentes procesos de extracción y de transformación para fabricar los bloqueos, en función de los diferentes materiales de amortiguamiento, derivados del plástico o del cartón ondulado, con el fin de poder mejorar el dato ambiental y de costes asociados a estas etapas.
- ✓ Desarrollar nuevo métodos para el cálculo y diseño de los bloqueos de protección, en el caso de materiales que no son propiamente espumas, pero que tienen capacidad amortiguante, como por ejemplo el cartón ondulado precomprimido.

- ✓ Desarrollo de un modelo de costes en vez de un modelo económico como el desarrollado en esta metodología de selección, en el que se contemple con más detalle los costes asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de los materiales/diseños contemplado; costes asociados a la disposición final una vez que la protección se convierte en residuo.
  
- ✓ Aplicar la metodología de selección para los materiales considerados en esta segunda experimentación, pero modificando los porcentajes de materia reciclada que pudieran utilizarse en su proceso de fabricación así como el porcentaje a reciclar en su disposición final, siempre que se pueda, en función de la estructura de los materiales /diseño contemplados.
  
- ✓ Contemplar la inclusión de otras variables tipo cualitativo a introducir en la metodología de selección desarrollada. Así por ejemplo la preferencia o aceptación del consumidor en función del material de amortiguamiento que constituye el bloqueo, el diseño del mismo por cuestiones ergonómicas, de presentación, de segundos usos etc. Asociada a esta investigación futura estaría como se puede valorar esta información para poderla incluir a nivel numérico, que tipo de herramienta se podrían utilizar para recopilar la información, por ejemplo; encuestas on – line con los casos de estudio, focus group etc.
  
- ✓ Estudiar en particular cuanto más está dispuesto a pagar un consumidor por un embalaje medioambientalmente más correcto, especialmente en experimentos de valor añadido y donde el residuo generado es especialmente importante, como es el caso de los productos electrónicos, resulta interesante para poder ponderar los diferentes criterios de selección o incluso ampliarlos.
  
- ✓ Desarrollar una aplicación informática, capaz de incorporar el cálculo del diseño optimizado de la espuma de protección y posteriormente caracterizarlo de forma económica y medioambiental tal y como se ha descrito a lo largo de esta tesis, Finalmente el programa realizando un análisis comparativo entre las diferentes opciones de material seleccionadas por el usuario, aplicando el análisis comparativo seleccionará la más óptima en base a la prioridad de los criterios 1 y 2 que hubiera decidido el usuario.

## BIBLIOGRAFIA TOTAL TESIS

- [1] AECOC. Recomendaciones AECOC para la logística (RAL), Unidades de carga eficientes (UCE), Aplicación de las unidades de carga eficientes, 1999.
- [2] AECOC. Recomendaciones AECOC para la logística (RAL), Envases embalajes y manipulación de productos en la cadena distributiva 2001.
- [3] Annual Book of ASTM Standards, 2006, America Society of Testing and Materials test Conshohocken, PA, Vol 15,09.
- [4] Anon J., 1996, State of the Industry report, Flexible Packaging association.
- [5] Aragonés, P., 1995; Aproximación a la Toma de Decisiones Multicriterio en Proyectos, Implementación de una Metodología Multicriterio y Multiexperto: Pres II, Universidad Politécnica de Valencia, 1995.
- [6] ASTM D1596 Standard Test Method for Shock Absorbing Characteristics of Package Cushioning Materials.
- [7] Barba-Romero, S., Pomerol, J.C., 1997. Decisiones Multicriterio, Fundamentos Teóricos y Utilización Práctica, (1 ed,) Servicios de Publicaciones Universidad de Alcalá.
- [8] Barba Romero, S.; Pomerol, J., 1997. Decisiones multicriterio, Fundamentos teóricos y utilización práctica, Colección de Economía, Servicio de Publicaciones, Universidad de Alcalá de Henares, Madrid.
- [9] Belton V., Stewart T.J., 2002. Multi Criteria Decision Analysis: an integrated approach, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [10] Borchardt M, Wendt M, Pereira g, Miguel A, Sellitto M., 2011. Redesign of a component based on ecodesign practices: environmental impact and cost reduction achievements, Journal of Cleaner Production 2011; 19; 49-57.
- [11] Bouyssou, D., Perny, P. 1.990. Ranking methods for valued preferences relations: a characterization of a method based on leaving and entering flows, European Journal of Operational Research, vol, 61, pp, 186 – 194.
- [12] Bovea, M.D., Gallardo A., 2006. The influence of impact assessment methods on materials selection for eco – design. Materials and design 27, 2006, 209-215

[13] Bovea, M.D., Serrano J., Bruscas G.M., and Gallardo A., 2006 Application of life Cycle Assessment to improve the environmental performance of a ceramic tile packaging system, *Packaging technology and science*, 19, 2006, 83-95, DOI ;10,1002/pts,711.

[14] Brans, J, P, et al,, 1,984, PROMETHEE a new family of outranking methods in multicriteria analysis, en *Operational Research'84*; Brans, J,P, ed, North Holland, pp, 408 – 421.

[15] Bras-Klapwijk RM., 2003, Procedures and tools for generating and selecting alternatives in LCA, *International Journal of life cycle assessment* 8(5), Págs, 266-272.

[16] Burgess G., 1994 Generation of cushion curves from one shock pulse, *Packaging, Technology and Sci*,1994; 7: 169-173.

[17] Caballero-Luque, A., 2004, Propuesta de una metodología para la alineación de los objetivos estratégicos de la empresa con los objetivos satisfechos por su canal ON-LINE utilizando Análisis Estructural y técnicas de ayuda a la toma de decisión multicriterio: AHP y ANP, Universidad Politécnica de Valencia.

[18] Capuz S., Gómez T., 2002. Ecodiseño, Ingeniería del ciclo de vida para el desarrollo de productos sostenibles.

[19] Daum M. A Simplified Process for Determining Cushion Curves: The Stress – Energy Method *Matt Daum-Dimensions*,06.

[20] De Monte M, Padoano E, Pozzeto D., 2005 Alternative coffee packaging: an analysis from a life cycle point of view, *Journal of food engineering* 66, Págs, 405-411,

[21] Directiva 94/62/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de diciembre de 1994 relativa a los envases y residuos de envases.

[22] Directiva 2004/12/CEE, de 11 de Febrero de 2004, por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los Envases y Residuos de Envases.

[23] David, E., Merilyn, B., 1996 *The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology*, Wiley, New York, 1996.

[24] Early C., Kidman K., Menvielle M., Geyer R., McMullan R., 2009. Informing packaging design decision at Toyota motor sales using life cycle assessment and costing. *Applications and implementation*.

- [25] Figueira J., Greco S., Ehrgott M., 2005. Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys, Springer, New York.
- [26] Finnveden G., Lars – Gunnar L., 1997. Life – Cycle impact assessment and Interpretation, LCA-NET Theme Report, Eco – informe Press, Estocolmo.
- [27] Fullana P., Vallés M., 2001. Análisis de ciclo de vida y su aplicación en la empresa, Ponencia del II Congreso Gallego de la Calidad, Abril 2001, Santiago de Compostela.
- [28] Fullana P., Puig R., 1997. Análisis del ciclo de vida, Editorial Rubes, Barcelona.
- [29] García – Romeu, M., 2008. Contribución a la determinación y simulación de las vibraciones e impactos en operaciones de transporte y distribución de productos de consumo embalados, Tesis doctoral, Universitat politècnica de València.
- [30] García – Romeu, M., Cloquell, V. Y Gomez, T., 2001. Metodología del diseño industrial, Editorial de la UPV, capítulo 11, pp 191-201.
- [31] Generalitat Valenciana, 1999, Símbolos y marcas verdes, Ed, Generalitat Valenciana, ISBN 84-482-2137-0, Valencia.
- [32] Giannis T., Tsoufas, Costeas P., Pappis, 2008. A model for supply chains environmental performance analysis and decision making, Journal of Cleaner Production volume 16, Issue 15, October 2008, Pages 1647-1657.
- [33], Gregory A., Norris., 2001. Integrating Life Cycle Coste Analysis and Life cycle Analysis InLCA: Selected papers, Int, J, LCA 6 (2)118-121.
- [34] Gordon G., 1972. Assessment of the shock – reducing properties of corrugated fibreboard, International conference on packaging technology, Pira/IAPRI, pp 36:1-15.
- [35] Hillary R., 1995 Life Cycle Assessment, Business and the Environment.
- [36] Hortal M., Vivancos J,L., Clemente G., Sánchez C., Aucejo S., 2005. Análisis de Ciclo de vida comparativo de dos envases de cartón ondulado para el transporte refrigerado de cítricos, Capítulo del libro "Análisis del Ciclo de Vida, Ed, Universidad Politécnica de Valencia, ISBN84-9705-852-6 Valencia.
- [37] Hortal, M., Vivancos J,L., Aucejo, S., Espí J,J., 2009. Methods for evaluating packaging sustainability Environmental Engineering and Management Journal ISSN: 1582-9596 September/October 2009 Vol,8 Nº5.

- [38] Iosip A., Hortal M., Dobón A., Bobu E., 2010. Comparative environmental impact assessment of corrugated board production, *Environmental Engineering and Management Journal* September 2010, Vol,9, No, 9, 1281-1287.
- [39] James, K., Cran, M., and Sonneveld, K., 2001. Life Cycle Assessment of Polystyrene Packaging Systems: High Impact Polystyrene (HIPS) Yoghurt Tubs, Final Report, Prepared for Polystyrene Australia, Centre for Packaging, Transportation and Storage Victoria University, Melbourne, 2 November.
- [40] Jarupan L., Kamarthi SV., Gupta SM, 2004. Application of combinatorial approach in packaging material selection, *Environmentally conscious Manufacturing IV* 5583, Págs,207-223.
- [41] Jönson G., 1996, LCA – A tool for measuring environmental performance, Pira International, Leatherhead.
- [42] Kipp W,I., 2000, Developments in testing products for distribution, *International Journal of Packaging Technology and Science*, vol 13, pp 89-98.
- [43] Ley 11/1997, de 24 de Abril, de Envases y Residuos de Envases.
- [44] Lombardi L., 2005. LCA comparison of two different types of food containers, *Proceedings of the Innovation by Life Cycle Management LCM2005 International Conference*, Barcelona, ISBN 84-609-65-67-8-X.
- [45] Martínez, E., 1998. Evaluación y Decisión Multicriterio: Una Perspectiva, EN: Evaluación y Decisión Multicriterio, Reflexiones y Experiencias, Editado por Eduardo Martínez y Mauricio Escudey, Editorial Universidad de Santiago, Pp 10-16.
- [46] Multipack – multimix, [www, Multiscience.de](http://www.Multiscience.de).
- [47] Navarro P., García – Romeu A., Cloquell V., Navarro E. 2011. Evolution of two simplified methods for determining cushion curves of closed cell foams, *Packag, Technol, Sci*, DOI: 10,1002/ pts 696.
- [48] Norma UNE-EN 13193:2000 sobre terminología de envases y embalajes y medioambiente.
- [49] Ness B., Urbel – Piirsalu, E., Anderberg S., Olsson L., 2007. Categorising Tools for sustainability assessment, *Ecological Economics*.

[50] Oestergaard S., 1991, Packaging goals in transport Quality 7<sup>th</sup> IAPRI World Conference on Packaging, Utrecht, the Netherlands.

[51] Paine F,A., 1991.The Packaging user ´s Handbook, blackie, New York.

[52] Proyecto ECO EPS para el Reciclado de envases y embalajes de poliestireno expandido usados: [www.anape.es](http://www.anape.es).

[53] Pugh S., 1991, Total Design, Integrated methods for successful product engineering, Addison Wesley; p, 67-101.

[54] Randagroup, 2005, [www.randagroup.es](http://www.randagroup.es)

[55] Real Decreto 782/98, de 30 abril, por el que se aprueba el Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 11/97 de envases.

[56] Real Decreto 252/2006, de 3 de marzo, por, el que se revisan los objetivos de reciclado y, valorización establecidos en la Ley 11/1997,

[57] Richards D,P., .1990. A review of analysis and assessment methodologies for road transportation vibration and shock data, Environmental Engineering, Dec, pp 23-26.

[58] Rieradevall J., et al., 2000 Rieradevall J., Doménech X., Bala A., Gazulla C., 2000, Ecodiseño de Envases, El Sector de la Comida Rápida, Elisava Edicions, I.S.B.N.: 84-931308-1-8, Barcelona.

[59] Romero C., 1993: Teoría de la decisión multicriterio: Conceptos, técnicas y aplicaciones, Alianza Editorial S. A. Madrid.

[60], Root D., 1997. Six step method for cushioned package development, [www.lasmont.com](http://www.lasmont.com).

[61] Rousseaux, P., Labouze, E., Suh, Y,-J., Blanc, I., Gaveglia, V., Navarro, A., 2001. An overall Assessment of Life Cycle Inventory Quality: Application to the Production of Polyethylene Bottles, International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 6, No. 5, Págs, 299-306.

[62] Rundth B., 2005. The multi-faceted dimension of packaging - Marketing logistic or marketing tool? British food journal 107 (9): pp, 670-684.

[63] Saaty, T.L., 1980. The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, New York, NY.

- [64] Saaty, T.,L.,2000. Fundamentals of decision making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process, RWS Publications, Universidad de Pittsburgh, U. S. A.
- [65] Saaty, T.,L., 2001. The Analytic Network Process; Decision Making with Dependence and Feedback (2 ed,); Pittsburg: RWS Publications,.
- [66] Saaty T.L., 1994. Fundamentals of decision making and priority theory with the AHP, RWS Publications, Pittsburg.
- [67] Saaty, T.L., Toma de decisiones para líderes; Pittsburgh: University of Pittsburg, 1996,
- [68] Saaty, T.L., 1998, Método Analítico Jerárquico (AHP): Principios Básicos, EN: Evaluación y Decisión Multicriterio, Reflexiones y Experiencias, Editado por Eduardo Martínez y Mauricio Escudey, Editorial Universidad de Santiago, Pp 17-46.
- [69] Sanz A., Carruesco X., Bosch T., Borghi V., Watson J., 2005, ACV del desengrasante KH7 quitagrasas. Capítulo del libro "Análisis del Ciclo de Vida, Ed. Universidad Politécnica de Valencia, ISBN84-9705-852-6, Valencia.
- [70] Sek M., Minett M., Rouillard V, Bruscella B., 2000, A new method for determination of cushion curves. Int, Journal of Packaging Technology and Science 13, p249-255.
- [71] Sek M.A., Kirkpatrick J., 1997. Prediction of cushioning properties of corrugated fibreboard from static and quasi – dynamic compression data. Int, Journal of Packaging Technology and Science, 10, p87-94.
- [72] Sek et al., 1999. Performance characteristics of paper based material Corrupad® for cushioning applications. 11<sup>th</sup> IAPRI World Conference on Packaging, pp 403-415 , Singapore.
- [73] Sek et al., 2001. Optimization of Packaging design through an integrated approach to the Measurement and laboratory simulation of transportation hazards. Proceedings of the 12<sup>th</sup> international conference on packaging, international association of packaging research institutes, Warsaw, Poland.
- [74] Sek M.A., Kirkpatrick J., 2001.Corrugated cushion design manual, Victoria University and Amcor, ISBN 1-86272-598-5.
- [75] Sek M.A., Rouillard V, 2005. Behavior of multi-layered corrugated paperboard cushioning systems under impact loads. Applied Mechanics and Materials, 3-4p, 383-388.

[76] Sek M., Rouillard V., Crawford S., Tarash H., 2005. Enhancement of cushioning performance with paperboard crumple inserts. *Int Journal of Packaging Technology and Science*, 18, p273-278.

[77] Shaw M.A., 2003. Sustainability principles for product design, *Design and manufacture for sustainable development*, p69-80.

[78] Singh L., Ignatova E., Olsen, Sighn P., 2010. Evaluation of stress – energy methodology to predict transmitted Shock through expanded foam cushion. *Journal of testing and evaluation*, 2010; vol 38: nº 6: 1 – 7.

[79] Steuer, R., 1986. *Multiple Criteria Optimization, Theory, Computation and Applications*. John Wiley.

[80] Sonneveld, K., 2000. The role of life cycle assessment as a decision support tool for packaging. *Int, Journal of Packaging Technology and Science* 13 (2) p55 – 61.

[81] Tan RBH., Khoo HH., 2005, Life cycle assessment of EPS and CPB inserts: design considerations and end of life scenarios, *Journal of environmental Management* 74, Págs, 195-205.

[82] Toncovich J. M., Moreno-Jiménez, R., Corral, 2007. Selección multicriterio de un sistema erp mediante las metodologías ahp y anp.

[83] Tadeusz Fijal., 2007. An environmental assessment method for cleaner production technologies. *Journal of cleaner Production*, Volume 15, Issue 10, 2007, p914-919.

[84] UNE –EN ISO 14040:2006. *Gestión ambiental, Análisis de ciclo de vida, Principios y marco de referencia*.

[85] UNE – EN ISO 14044:2006. *Gestión ambiental, Análisis de ciclo de vida, Requisitos y directrices*.

[86] UNE – EN ISO 14045:2012. *Gestión ambiental, Evaluación de la ecoeficiencia del sistema del producto, Principios, requisitos y directrices*.

[87] UNE – EN ISO 14046:2014. *Gestión ambiental, Huella de agua, Principios, requisitos y directrices*.

[88] Vergara E., Bala A., Rieradevall J., Doménech X. 2001. Comparación ambiental mediante ACV de europaletas de madera, plástico y cartón. *Residuos* 12 N °68, p100-105.

[89] Veselea Veleva, Michael Ellenbecker, 2001. Indicators of sustainable production; framework and methodology. *Journal of Cleaner Production*, Volume 9, Issue 6, December 2001, p519-549.

[90] Virtanen Y., Ojaniemi U., Poikkimäki S., Katajajuuri J., 2002. Life cycle assessment of potential environmental impacts of finnish beverage packaging systems-Summary report, PTR publications.

[91] Vivancos J.L., Hortal M., Gómez Navarro T., Navarro P., Bastante M.J., Collado D., Capuz S., Aucejo S., 2005. Estudio de las características ambientales y económicas de los envases de cartón ondulado con respecto a los envases reutilizables de plástico utilizados en el transporte a larga distancia de productos hortofrutícolas. Ed. ITENE - ISBN: 84-921255-2-7, Noviembre, Valencia.

[92] WCED Our common future, 1987. Oxford University press, Oxford.

[93] W.C.P. Flaum., 1995. How? An exploration of packaging's role in dealing with the population and prosperity of the coming millennium. *Proceedings of the 11 th International Association of Packaging research Institutes*, Singapore, pp, 1-15.

[94] Tang Y.K., Stoyanov S., Bailey C., and H.Lu., 2006. Decision support system for eco – friendly electronic products,. *Electronic Materials and Packaging*, 2006, EMAP 2006, International Conference.

[95] Zabaniotou A., Kassidi E., 2003. Life cycle assessment applied to egg packaging made from polystyrene and recycled paper. *Journal of Cleaner Production* volume 11, Issue 5, August 2003, p549-559.