

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:
INDICE

TESIS DOCTORAL

PRESENTADA POR:

Patricia Navarro Javierre

DIRIGIDA POR:

Dr. Vicente Agustín Cloquell Ballester

Dr. Manuel García - Romeu Martín

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.	6
1.1.	JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.	9
1.2.	CUESTIONES A INVESTIGAR.	13
1.3.	PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.	14
2.	MARCO DE REFERENCIA.	16
2.1.	EL EMBALAJE DE PROTECCIÓN EFICIENTE.	16
2.2.	MÉTODO PARA EL DESARROLLO DE PROTECCIONES DE MATERIAL DE AMORTIGUAMIENTO OPTIMIZADOS.	17
2.3.	MÉTODOS PARA LA SELECCIÓN DE UN BLOQUEO DE PROTECCIÓN OPTIMIZADOS.	20
2.4.	MÉTODOS MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN.	21
2.5.	EVALUACIÓN AMBIENTAL DE ENVASES Y EMBALAJES.	33
3.	OBJETIVOS E HIPÓTESIS.	36
3.1.	OBJETIVOS.	36
3.2.	HIPÓTESIS.	38
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.	41
4.1.	EXPERIMENTO 1. ESTUDIO COMPARATIVO DE LA FIABILIDAD DE LAS CURVAS DE AMORTIGUAMIENTO.	41
4.2.	EXPERIMENTO 2. SELECCIÓN DEL MATERIAL DE AMORTIGUAMIENTO ÓPTIMO.	45
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.	46
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).	49
4.2.3.	Desarrollo de un modelo económico. Criterios económicos (C2)	49
4.2.4.	Metodología basada en el análisis comparativo.	51
5.	RESULTADOS.	55
5.1.	EXPERIMENTO 1. ESTUDIO COMPARATIVO DE LA FIABILIDAD DE LAS CURVAS DE AMORTIGUAMIENTO.	55
5.2.	EXPERIMENTO 2. SELECCIÓN DEL MATERIAL DE AMORTIGUAMIENTO ÓPTIMO.	69
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.	71
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.	76
5.2.2.1.	Análisis de ciclo de vida del bloqueo de poliestireno expandido (EPS):	77
5.2.2.2.	Resultados del Análisis de ciclo de vida del bloqueo de PE no reticulado Select Azul, Etafoam®.	82
5.2.2.3.	Resultados del Análisis de ciclo de vida del bloqueo de espuma de PE reticulada ML – 33.	90
5.2.3.	Desarrollo de un modelo de costes para el bloqueo de material de amortiguamiento: Criterio económico.	97
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.	101

6.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.	106
7.	FUTURAS INVESTIGACIONES.	114

Listado de figuras:

Figura 1	Protecciones interiores de espuma de PE. Fuente: Plaesa, Sealed air, Modisprem.	12
Figura 2	Protecciones interiores de EPS. Fuente: Plaesa, Valero.	12
Figura 3	Protecciones interiores de cartón comprimido. Fuente: Corrupad®.	12
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.	18
Figura 5	Representación de la ecuación exponencial del método de Burgess; Dynamic Stress (GS) vs Dynamic energy (sh/t).	20
Figura 6	Modelo Jerárquico para la Toma de decisiones con el AHP.	26
Figura 7	Escala de Saaty.	27
Figura 8	Muestras de 15 × 15 cm y 5 cm de espesor de las diferentes espumas.	37
Figura 9	Máquina de amortiguamiento + acelerómetro.	43
Figura 10	Máquina de compresión rápida.	44
Figura 11	Detalle máquina de compresión rápida.	45
Figura 12	Materiales de amortiguamiento seleccionados para la investigación: ML-33 (30 kg/m ³), Etafoam® (29 kg/m ³), EPS (10 kg/cm ³).	47
Figura 13	Máquina de cushion desarrollada por ITENE.	47
Figura 14	Diferentes análisis y técnicas utilizadas para el desarrollo de la metodología de selección.	52
Figura 15	Esquema de la metodología de selección.	53
Figura 16	Comparación de los resultados del PE y EPS en la representación gráfica de la carga frente a la deformación.	56
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.	57
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.	57
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.	58
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.	59
Figura 21	Comparación de las curvas obtenidas para la espuma de PE y el EPS, al representar el Tensión dinámica vs Energía dinámica.	60
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	61
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.	62
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.	63

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.	63
Figura 26	Errores medios y máximos de los dos métodos frente a la altura de caída EPS.	65
Figura 27	Errores medios y máximos de los dos métodos frente a la tensión estática. EPS.	66
Figura 28	Errores medios y máximos de los dos métodos frente a la altura de caída. PE.	68
Figura 29	Errores medios y máximos de los dos métodos frente a la tensión estática. PE.	68
Figura 30	Cushion curves for the three-cushion material and 30, 60, 90, 120 cm (h of design).	73
Figura 31	Curvas de amortiguamiento de los tres materiales objeto de estudio y para una altura de caída de 90 cm.	74
Figura 32	Protección diseñada para PE foam; non-cross linked (Select Blue Etafoam®), and cross-linked (ML – 33)	75
Figura 33	Bloqueo de EPS.	77
Figura 34	Ciclo de vida del bloqueo de EPS.	78
Figura 35	EPS protecciones moldeadas y paletizadas (1.200 × 800 mm). 55 eps protecciones/pallet.	80
Figura 36	TV set embalado con protecciones de EPS (1.200 × 800 mm).Dimensión de la caja de c.o.: 1203×266×682 mm.	81
Figura 37	Esquema del ciclo de vida del Select Azul Etafoam®.	84
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).	86
Figura 39	Protecciones centrales y de esquina de Select Blue Etafoam® and ML-33 paletizadas (1.200 × 800 mm).	87
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.	87
Figura 41	Esquema del ciclo de vida del bloqueo de espuma de PE ML -33.	90
Figura 42	Gráfica comparación del ciclo de vida de los 3 bloqueos.	96

Listado de tablas:

Tabla 1	Resumen del experimento para determinar las curvas de amortiguamiento en el experimento 1.	42
Tabla 2	Resumen del experimento para la obtención de las curvas de amortiguamiento en el experimento 2.	48
Tabla 3	Descripción de los criterios considerados.	53
Tabla 4	Resumen del error máximo y medio para ambos métodos simplificados frente al estándar para el EPS.	64
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.	66
Tabla 6	Resumen del error medio y máximo calculado para las siete alturas de caída y PE-Etafoam®.	67
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®.	68

Tabla 8	Valores de la altura de caída en función del peso del producto y diferentes niveles de seguridad.	71
Tabla 9	Valores de fragilidad en función de diferentes tipos de producto.	72
Tabla 10	Tabla resumen del peso de cada uno de las protecciones diseñadas en función de sus prestaciones físico – mecánicas (curvas de amortiguamiento).	75
Tabla 11	Total cushion material considered.	97
Tabla 12	Costes transporte 0.	98
Tabla 13	Costes de fabricación.	99
Tabla 14	Costes transporte 1.	99
Tabla 15	Costes de almacenamiento asociados.	100
Tabla 16	Costes asociados a la TV embalada.	100
Tabla 17	Costes asociados a cada diseño de protección.	100
Tabla 18	Resultados criterio 1.	102
Tabla 19	Resultados criterio 2.	103
Tabla 20	Resultado de la suma de los dos criterios para cada una de las alternativas.	104
Tabla 21	Procedimiento para estimar los dos criterios medioambiental y económico.	110
Tabla 22	Resultados del análisis de sensibilidad.	112
Tabla 23	Clasificación de los tres materiales en función de los resultados del análisis de sensibilidad.	113

Listado de ecuaciones:

Ecuación 1	Ecuación de la tensión estática	18
Ecuación 2	Ecuación del método de Burgess	20
Ecuación 3	X ₁ : El coste de las materias primas del material de amortiguamiento.	51
Ecuación 4	X ₂ : Transporte 0 (100 km) de las láminas de espuma desde el fabricante al procesador.	51
Ecuación 5	X ₃ : Costes derivados de la transformación del material.	51
Ecuación 6	X ₄ : Costes asociados al transporte de las protecciones desde el fabricante de embalaje hasta el fabricante de televisores.	51
Ecuación 7	X ₅ : Costes asociados al espacio ocupado en el almacén del fabricante de producto.	51
Ecuación 8	X ₆ : Costes asociados al transporte del televisor una vez embalado.	51
Ecuación 9	Ecuación de costes de la metodología	51